

平成 26 年度

修士論文

間隙幅を考慮した充填モルタルの
最適充填条件に関する研究

首都大学東京大学院

都市環境科学研究科 都市基盤環境学域

学修番号 13885406 尾原 弘樹

指導教員 博士（工学） 宇治 公隆

目次

第1章 序論

1.1 研究の背景.....	1
1.2 研究の目的.....	3
1.3 論文の構成.....	4
参考文献.....	6

第2章 既往の研究

2.1 間隙充填モルタル.....	7
2.1.1 間隙充填モルタルの分類.....	7
2.1.2 無収縮グラウト材の特徴.....	8
2.1.3 土木・建築分野の構造補強工法における間隙充填モルタル.....	9
2.1.4 間隙充填モルタルの要求性能.....	11
2.1.5 間隙充填モルタルの品質管理基準.....	12
2.2 間隙充填モルタルの流動性.....	13
2.2.1 レオロジー.....	13
2.2.1 J漏斗流下試験.....	15
(1) 試験概要.....	15
(2) J漏斗流下時間による塑性粘度の算出式.....	16
2.2.3 フロー試験.....	19
2.2.4 回転粘度計を用いたレオロジー定数の測定.....	21
2.3 間隙充填モルタルの材料分離抵抗性.....	22
2.3.1 間隙充填モルタルにおける材料分離.....	22
2.3.2 粘性流体中の粒子の沈降.....	22
2.3.3 単独骨材沈降実験による材料分離抵抗性の評価.....	24
(1) 試験概要.....	24
(2) 実験方法.....	24
(3) 実験結果.....	25
2.3.4 材料分離抵抗性評価手法.....	27
(1) 塩化ビニルパイプを用いた試験方法.....	27
(2) J14漏斗を用いた試験方法.....	29
2.4 間隙充填モルタルの充填性.....	30

2.4.1 高流動コンクリートの間隙通過性.....	30
2.4.2 高流動コンクリートの充填性試験.....	33
2.4.3 Zingg による粒子形状の区分.....	35
2.4.4 昨年度までの検討.....	36
(1) 流動性が間隙充填に与える影響.....	36
(2) 材料分離抵抗性が間隙充填に与える影響.....	37
2.5 今年度の検討課題.....	39
参考文献.....	40

第3章 塑性粘度の相違が充填性に及ぼす影響

3.1 はじめに.....	43
3.2 実験概要.....	44
3.2.1 使用材料.....	44
(1) セメント.....	44
(2) 細骨材.....	44
(3) 混和剤.....	45
3.2.2 配合.....	45
3.2.3 試験項目.....	46
3.2.4 練混ぜ方法.....	46
3.2.5 試験方法.....	47
(1) J漏斗流下試験.....	47
(2) 簡易テーブルフロー試験.....	48
(3) 粘度測定試験.....	49
(4) 間隙充填性試験.....	50
3.3 流動性試験結果.....	53
3.3.1 全試験結果.....	53
3.3.2 混和剤の添加量.....	54
3.3.3 降伏値と塑性粘度.....	55
3.3.4 フローとレオロジー定数.....	56
3.3.5 J漏斗流下時間とレオロジー定数.....	58
3.3.6 フロー到達時間とレオロジー定数.....	60
3.3.7 ガラス板フローとアクリル板フロー.....	62
3.4 流動性が充填性に及ぼす影響.....	64

3.4.1 間隙充填率とレオロジー定数	64
3.4.2 間隙充填率と J 漏斗流下時間およびフロー到達時間	66
3.4.3 間隙充填率とフロー	68
3.4.4 間隙幅に応じた塑性粘度および各試験値の上限値	70
3.5 まとめ	71
参考文献	72

第 4 章 骨材粒径の相違が充填性に及ぼす影響

4.1 はじめに	73
4.2 実験概要	73
4.2.1 使用材料	73
(1) セメント	73
(2) 細骨材	74
(3) 混和剤	75
4.2.2 配合	75
4.2.3 練混ぜ方法	76
4.2.4 試験項目	76
4.2.5 試験方法	77
(1) J 漏斗流下試験	77
(2) 簡易テーブルフロー試験	78
(3) 回転粘度計を用いたレオロジー定数の計測	79
(4) 間隙充填試験	80
(5) 材料分離抵抗性試験	83
4.3 流動性試験結果	87
4.3.1 全試験結果	87
4.3.2 混和剤の添加量	88
4.3.3 降伏値と塑性粘度	90
4.3.4 流動性試験結果と塑性粘度	91
(1) フローと塑性粘度	91
(2) J 漏斗流下時間と塑性粘度	92
(3) フロー到達時間と塑性粘度	94
4.3.5 ガラス板フローとアクリル板フロー	96
4.4 流動性が充填性に及ぼす影響	98

4.4.1 間隙充填率と塑性粘度.....	98
4.4.2 間隙充填率とフロー.....	100
4.5 材料分離抵抗性が充填性に及ぼす影響.....	102
4.5.1 分離抵抗指数と塑性粘度.....	102
(1) 鉛直分離抵抗指数 SR_V	102
(2) 水平分離抵抗指数 SR_H	102
4.5.2 間隙充填率と分離抵抗指数.....	104
(1) 鉛直分離抵抗指数 SR_V	104
(2) 水平分離抵抗指数 SR_H	104
4.5.3 材料分離抵抗性が充填性に及ぼす影響.....	106
4.5.4 段差フロー試験における段差の影響.....	107
4.6 まとめ.....	109
参考文献.....	110

第5章 結論

5.1 塑性粘度の相違が充填性に及ぼす影響.....	109
5.2 骨材粒径の相違が充填性に及ぼす影響.....	109
5.3 まとめ.....	110

謝辞

第1章 序論

1.1 研究の背景

日本は、高度経済成長に伴い、新幹線、高速道路、港湾、空港をはじめとして、多岐に渡る社会基盤構造物を造り上げてきた。これらは現代にも多く引き継がれ、多くの国民の生活の基盤として存在している。しかしながら、建設後、数十年を経過し、多額の維持管理費・更新費がかかる状況となり、今後どのように維持管理し、次の世代へと受け継いでいくかが早急の課題となっている。

従来、コンクリート構造物は耐久性に優れ、メンテナンスフリーで半永久的に供用できるものだと考えられてきた。しかし、様々な研究結果や検査結果より、コンクリートの経年劣化によって構造物の安全性が損なわれることが報告され、種々のメンテナンスを施さなければ長期の供用に耐えられなくなることが明らかとなってきた。また、建設時における初期欠陥や施工不良等によるコンクリート剥落事故が発生し、これらの事故に起因する第三者被害などにより、コンクリート構造物の安全面の信頼性が失われつつある。

さらに、このように維持管理の重要性が高まる中、平成7年1月17日に阪神・淡路地域を襲った兵庫県南部沖地震では、道路橋をはじめとする社会基盤施設が大きな被害を受けた。中でも鉄筋コンクリートの橋脚において、曲げひび割れに伴うせん断破壊が多数生じ、多くの橋梁に被害をもたらした¹⁾。加えて、平成23年3月11日に東北から関東にかけての東日本一帯に甚大な被害をもたらした東北地方太平洋沖地震では、改めて緊急輸送道路の整備が重要視され、全国で既存構造物の耐震補強工事の必要性がより一層高まり、その工事進捗は著しく増加し、加速している。

種々の耐震補強工法の1つに、鋼板巻立て工法がある。これは橋脚などの既設の柱の全周に鋼板を巻き立て、柱と鋼板の間隙を充填材で満たし、柱と鋼板の一体化を図ることで、曲げ耐力および靱性の両者の向上を図るものである。充填材には樹脂系グラウト材やセメント系グラウト材がある。樹脂系グラウト材は接着性、ひび割れ注入性、充填性において非常に優れた性能を有している²⁾が、施工性および経済性の観点から狭い間隙を充填する場合に用いられる事が多い。対してセメント系グラウト材は、その特性から広い間隙を充填する際に用いられる事が多い³⁾。

セメント系グラウト材（以下、間隙充填モルタル）に求められる性能としては、間隙を密に充填できる高い充填性が要求される。この充填性を左右するのは、流動性と材料分離抵抗性の二つである。狭い間隙内でも充填可能な流動性が求められるのはもちろんのこと、流動中に骨材相とセメントペースト相が分離して閉塞を起こしてしまわないような材料分

離抵抗性が必要となる。これらは一般的に相反する性能と考えられ、両者を満たす間隙充填モルタルの作製や、その評価は難しいとされている。施工現場では、施工条件に適合する材料の選定や、練混ぜ方法が技術者の判断に委ねられているのが現状である。このため、全ての施工現場で間隙を完全に充填できているかは不明である。

間隙充填モルタルのフレッシュ時におけるワーカビリティの評価方法として、J漏斗を用いた流下試験が用いられてきた。J漏斗流下時間は、間隙充填モルタルの粘性との深い関係があるが、粘性のみでは充填性を適切に評価できているとは言い難いことが報告されている。また、測定値の写真記録が困難であること、測定者の測定誤差が生じる事を考慮し、近年では簡易テーブルフロー試験を併用することで充填性を評価している。なお、テーブルフロー試験も材料分離抵抗性の影響を考慮しておらず、未だ間隙充填モルタルの材料分離抵抗性に関する指標は存在せず、目視や手触りに頼らざるを得ない状況にある。

建築分野では、「建築改修工事管理指針（下巻）平成 19 年版」において鉄筋コンクリート壁の増設工事における壁頭部の隙間や鉄筋枠付きブレース架構の鉄筋枠内に使用する無収縮グラウト材の標準軟度を評価する方法として、J14 漏斗と簡易テーブルフロー試験を併用するよう定めている⁴⁾。土木分野では、2013 年のコンクリート標準示方書〔規準編〕において、充填モルタルの流動性試験方法（JSCE-F541）では J14 漏斗、PC グラウトの流動性試験方法（JSCE-F531）では JA 漏斗および JP 漏斗を用いることを提案している⁵⁾。

充填性を評価するための試験方法には、以前より様々な方法が提案されているが、その妥当性、適切な使用方法については、未だ不明瞭な点が多く、充填性を直接的に評価する方法は未だ確立していない。間隙充填モルタルに求められる性能も多様化しており、充填性の評価手法の確立が課題となっている。

1.2 研究の目的

間隙充填モルタルの用途は様々だが、主として狭い間隙を密に充填することが求められる。用途によってその間隙幅にも差があるが、例えば、鋼板巻立て工法では、鋼板と橋脚の間隙は不陸や鋼板の変形等で誤差を生じやすく、最狭部を 5mm 以上確保するため、間隙幅を 20mm 以上にすることが好ましい⁶⁾とされる。

筆者らは、充填性を評価する試験として二重円筒式間隙充填性試験装置⁷⁾を考案し、種々の評価試験との比較から、様々な検討を行ってきた。その中で特に、降伏値と関係のあるフロー値に着目し、間隙幅と骨材粒径に応じた最適なフロー値の目安を提案してきた⁸⁾。

本研究では、間隙充填モルタルの流動性、材料分離抵抗性、および骨材粒径が間隙充填性に及ぼす影響について検討し、特に、フロー以外の要因が充填性に影響を与える影響について検討した。

具体的には、以下の項目について検討した。

間隙充填モルタルの流動性は、フロー、J漏斗流下時間、フロー到達時間、レオロジー一定数を指標として評価した。フローを一定の値に統一した場合に、塑性粘度が充填率に及ぼす影響を明らかとし、間隙幅と骨材粒径に応じた適切な塑性粘度の目安の提案を行った。骨材粒径は、最大粒径の異なる細骨材を用いて、間隙幅との関係性について検討した。また、材料分離抵抗性は、沈降による分離が影響する鉛直方向の材料分離抵抗性と、流動時の骨材の分離が影響する水平方向の材料分離抵抗性に分け、それぞれが充填性に及ぼす影響を検討した。

1.3 論文の構成

本論文は全5章で構成されている。

「第1章 序論」では、本研究の背景および研究の目的を示している。

「第2章 既往の研究」では、間隙充填モルタルの要求性能、品質管理基準および流動性に関わりの深いレオロジー理論についてまとめている。また、本研究室で行われてきた研究を抜粋し、特に流動性と材料分離抵抗性が充填性に与える影響についての結果を取りまとめた。

「第3章 塑性粘度の相違が充填性に及ぼす影響」では、間隙充填モルタルの流動性に着目し、充填性に及ぼす影響を検討した。既往の研究よりフローが充填性に影響を与えることが明らかとなっており、フローを250mm ($\pm 5\%$) に統一し、塑性粘度の相違が充填性に及ぼす影響を考察した。塑性粘度が1000mPa \cdot s から7000mPa \cdot s となるように増粘剤の添加量を調整し、フローが250mm ($\pm 5\%$) となるように高性能AE減水剤の添加量を調整した。また、1.2mm以上の細骨材を使用しないことで、骨材粒径と間隙幅の影響を考慮せずに、流動性、特に塑性粘度が間隙充填性に与える影響に限って検討した。水セメント比は市販の充填材に多く用いられている0.4とし、細骨材セメント比（セメントに対する細骨材の質量比）は0.8とした。充填性の評価には、本研究室で考案された二重円筒式間隙充填性試験装置を用い、その間隙幅は2、3および5mmの3水準として考察した。実験の結果、塑性粘度が増加するに従い、どの間隙幅でも一様に充填率が低下していることが明確となった。間隙充填率90%以下を未充填と判断すると、各間隙幅に対する塑性粘度の上限を定めることができ、本研究の範囲内であれば、フローが250mm ($\pm 5\%$) に統一された場合、5mmに対しては8500mPa \cdot s程度、3mmに対しては4500mPa \cdot s程度、2mmに対しては2500mPa \cdot s程度が上限となる。

「第4章 骨材粒径の相違が充填性に及ぼす影響」では、間隙充填モルタルに含まれる骨材の粒径が充填性に及ぼす影響を検討した。使用骨材の粒径に着目し、S:小粒径細骨材のみ、M:小粒径細骨材と大粒径骨材(1.2-2.5mm)、L:小粒径細骨材と大粒径細骨材(2.5-5.0mm)の3シリーズで検討した。小粒径細骨材と大粒径細骨材の混合割合は質量比で8:2である。配合に関する条件は第3章の検討と同様である。材料分離抵抗性は、沈降による骨材の分離が影響する鉛直方向の材料分離抵抗性と、流動時の骨材の分離が影響する水平方向の材

料分離抵抗性に分けて考え、評価指標として鉛直分離抵抗指数 SR_V と水平分離抵抗指数 SR_H を定義した。

実験の結果、間隙幅 2mm では、M シリーズおよび L シリーズは充填できなかった。間隙幅 3mm では、M シリーズは粒径の影響がなく充填可能であるが、L シリーズは充填できなかった。間隙幅 5mm では、M シリーズは粒径の影響がなく、充填可能である。L シリーズは、塑性粘度が $2500\text{mPa}\cdot\text{s}$ 以下の場合、骨材の架橋現象によると考えられる未充填が生じるが、 $2500\text{mPa}\cdot\text{s}$ を超えると充填率は急激に上昇する。そこで、本研究の範囲内であれば、塑性粘度の下限を $2500\text{mPa}\cdot\text{s}$ 程度と定めることができる。また、骨材の架橋による未充填は、骨材の沈降分離に対する抵抗性だけでは評価できず、試料が流動する際の骨材分布によって評価できることが示唆された。

「第 5 章 結論」では、本研究で得られた知見をとりまとめている。

参考文献

- 1) 秋谷由則、東伸佳、山崎秋信、富沢友悦、野間秀行、松本享：鋼板巻立て工法によるRC橋脚の耐震補強工事について、川田技報、Vol.16、pp.94-99、1997
- 2) 松里広昭、岡本享久、窪川豊之：最近の補修・補強材料について、コンクリート工学、Vol.33、No.12、pp.33-42、1995
- 3) 木虎智子、杉浦章雄、榊原弘幸：骨材粒径がグラウト材の間隙充填性および分離抵抗性に及ぼす影響について、セメント・コンクリート論文集、No.51、pp.400-405、1997.
- 4) 財団法人建築保全センター：建築改修工事管理指針平成19年度下巻(国土交通省大臣官房官庁営繕部監修)
- 5) 社団法人土木学会：2013年制定 コンクリート標準示方書〔規準編〕JIS規格集、2013
- 6) 近藤直孝、半田実、福嶋一秋、柳沢直仁：特殊グラウト材の耐震補強工事・鋼板巻立て工法への適用、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.2、pp.119-124、1996
- 7) 石山陽介、水島遼、宇治公隆、上野敦：間隙充填材の流動性および充填性の評価手法、コンクリート工学年次論文集、Vol.32、No.1、pp.1331-1336、2010
- 8) 出口慎太郎、宇治公隆、上野敦、大野健太郎：間隙充填モルタルの充填性に及ぼす影響要因、コンクリート工学年次論文集、Vol.36、pp.1528-1533、2014

第2章 既往の研究

2.1 間隙充填モルタル

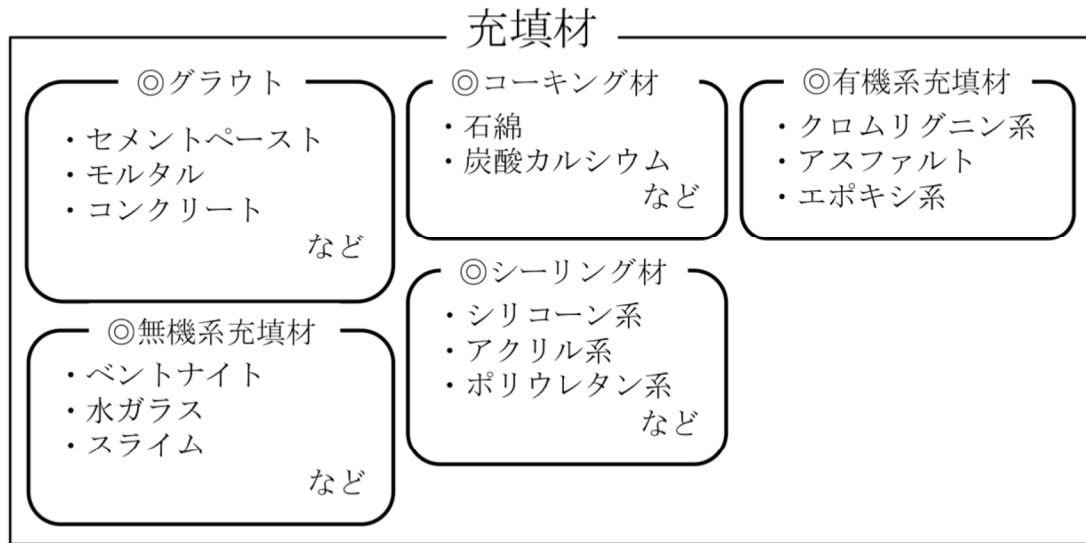
2.1.1 間隙充填モルタルの分類¹⁾

充填材には、従来から使用されてきたものとして、PC グラウト、鉄筋継手グラウト、プレパックドコンクリート用注入グラウト、構造物の補修・補強注入グラウト、ダム継目グラウト、トンネルやシールドの裏込めグラウト、プレキャスト用グラウト、橋梁の支承下グラウト、機械台座下グラウト、軌道スラブ下グラウト、および原子力発電所格納容器下グラウトなどがある。近年では新しい分野においても、斜張橋の斜材グラウト、鋼材継手グラウト、RM 構造用グラウト、舗装版下グラウト、グラウンドアンカー用グラウト、貯蔵ピット用グラウト、逆打ち高流動コンクリートおよび各種充填コンクリートなど、セメントペーストやモルタルとしてだけではなく、コンクリートとしても幅広く活用されている。

充填材の主たる使用材料としては、流動性の程度がフローまたはスランプフローで評価される軟練りのセメントペースト、モルタルまたはコンクリートの無機系材料で、その中に有機系材料が 10%程度まで混合されているものや、構造物の補修・補強注入グラウトとしてのエポキシ樹脂やアクリル樹脂系のもの、地盤注入グラウトとしての薬液グラウトなどがある。

充填材とは、構造体の間隙を埋める全ての材料を総括する用語であって、コンクリートを含むものとし、グラウトは、コンクリートを除くセメント系の充填材に対する用語として用いられるのが現状である。そこで充填材を広義に解釈して、「構造体の間隙」を「永久型枠中」および「鋼材中」等も対象とし、それらの中に充填する「充填コンクリート」も含むものとした。すなわち、間隙充填モルタルは、広義に解釈すれば、無収縮グラウトに分類されるが、狭義に解釈すれば、より狭い間隙を充填させるために用いられる無機系材料としてのモルタルとなる。

充填材とグラウトとの分類は図-2.1 に示すようである。



※一部加筆

図-2.1 使用材料としての充填材とグラウトとの分類

2.1.2 無収縮グラウト材の特徴²⁾

無収縮グラウト材は、セメント、細骨材、混和材料および膨張材で構成され、プレミックスされたものが一般的である。無収縮グラウト材の特徴として、以下のものが挙げられる。

- (1) 良好な流動性：普通モルタルと比較して、優れた流動性を有する事から、間隙への充填がスムーズにでき作業性に優れる。
- (2) ノンブリーディング：充填後にブリーディング水が発生しないため、硬化後に間隙が生じない。
- (3) 無収縮性：膨張成分の効果により、一定の拘束条件下で無収縮性が得られる。
- (4) 強度特性：初期強度が高く、長期的にも安定した強度発現性が得られる。なお、無収縮グラウト材には高強度、超速硬性、低発熱性等の特性を有するものがあり、用途に応じて選定されている。

2.1.3 土木・建築分野の構造補強工法における間隙充填モルタル²⁾

間隙充填モルタルは、様々な構造物に異なる目的で用いられているので、全ての用途をここで記述するのは難しい。そこで、構造物の補強工法を例にとり、土木分野における補強工法とその使用材料を図-2.2に示す。

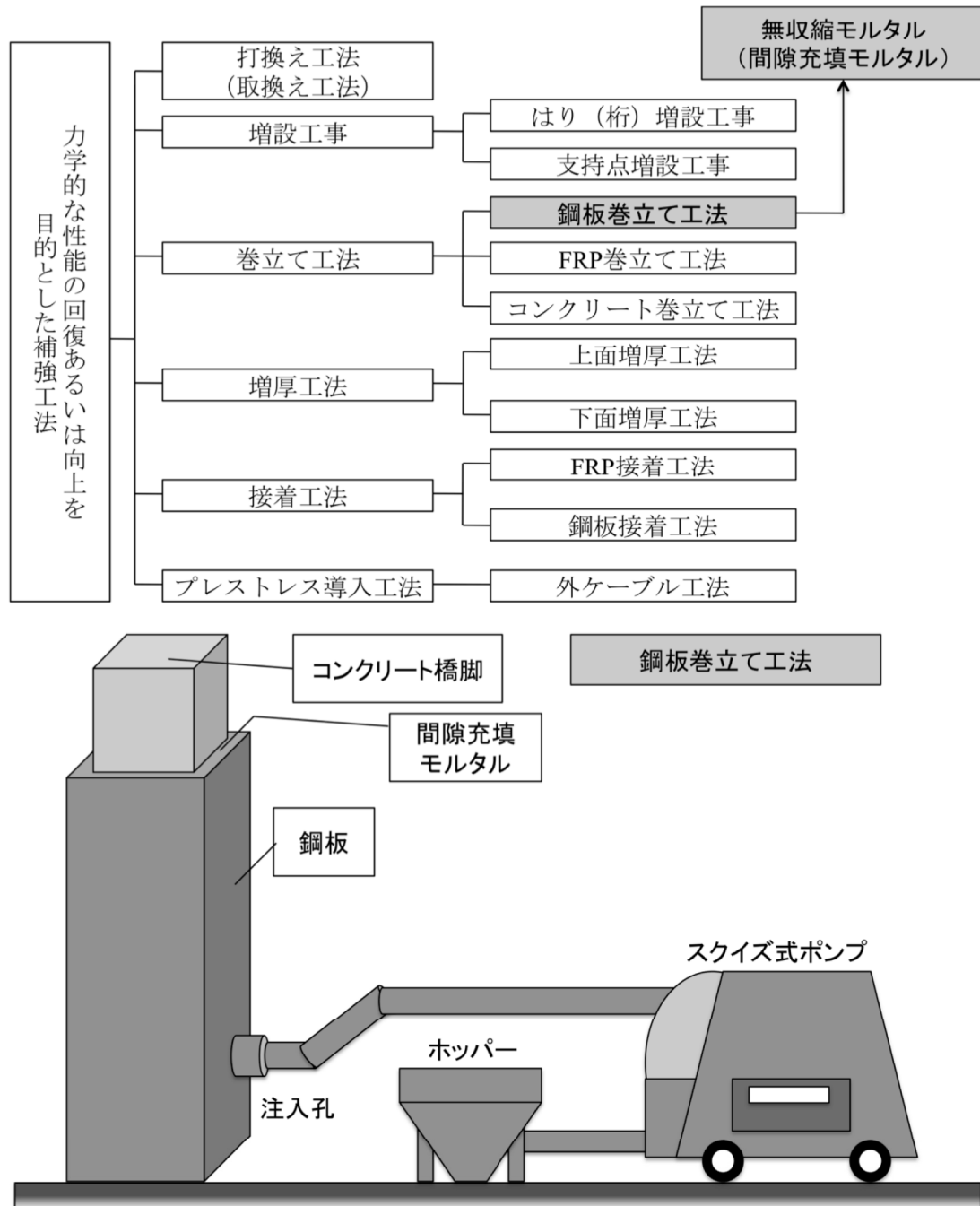


図-2.2 土木分野の補強工法とその使用材料

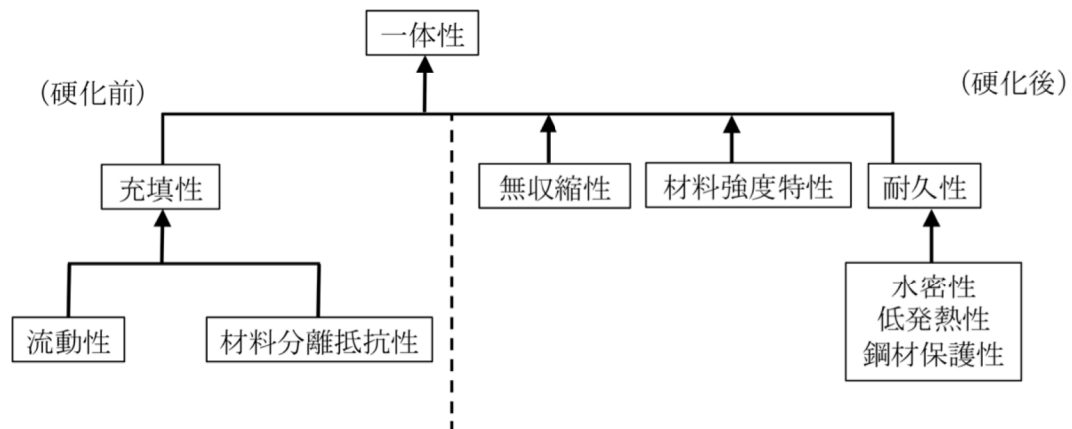
また建築分野では、既設構造物の耐震性の向上を目的とした補強が多い。建築分野における補強工法とその使用材料を図-2.3に示す。



図-2.3 建築分野の補強工法とその使用材料

2.1.4 間隙充填モルタルの要求性能

間隙充填モルタルを用いた構造物において一体性を満足するためには、2.1.2に示した特徴を十分に発揮する必要がある、図-2.4に示す各種性能が求められる。本研究ではこの中でも硬化前の性能である充填性に着目しており、流動性と材料分離抵抗性の二つの観点から充填性を評価することを目的としている。

図-2.4 間隙充填モルタルに要求される性能³⁾

2.1.5 間隙充填モルタルの品質管理基準

間隙充填モルタルは様々な用途で使用されており、間隙充填モルタルに対する要求性能や確認方法も工法ごとに異なるため、全てを記述するのは困難である。加えて、用途によって配合方針が異なるため、硬化前の流動特性なども多種多様である。ここでは、間隙充填モルタルの品質規格の例として以下の3つを表-2.1 および表-2.2 に示す。

- (1) 建築改修工事監理指針⁴⁾
- (2) NEXCO 試験方法 第3編 コンクリート関係試験方法 JHS 312-1999「無収縮モルタル品質管理試験方法」⁵⁾
- (3) 日本建築学会建築工事標準仕様書 JASS 15 M-103「セルフレベリング材の品質基準」⁶⁾

表-2.1 建築改修工事管理指針および JHS 312-1999「無収縮モルタル品質管理試験方法」

性状分類	試験項目	規格値	
		建築改修工事監理指針	NEXCO（旧日本道路公団） JHS 312 1999「無収縮モルタルの品質管理試験」
フレッシュ性状	J14漏斗流下時間	8±2秒	8±2秒 (鋼板巻立ての場合、10±3秒)
	フロー	—	250 (±10) mm
	凝結時間	始発1時間以上、終結10時間以内	
強度特性	圧縮強度	材齢3日：20N/mm ² 以上 材齢28日：40N/mm ² 以上	材齢3日：25N/mm ² 以上 材齢28日：45N/mm ² 以上
	付着強度	材齢28日：2.5N/mm ² 以上	
収縮性状	ブリーディング	練混ぜ2時間後、2%以下	練混ぜ2時間後、2%以下 (鋼板巻立ての場合、0%以下)
	膨張収縮	材齢7日：収縮を示してはならない	

表-2.2 JASS 15 M-103「セルフレベリング材の品質基準」

性状分類		規格値
フロー		190mm以上
凝結時間	始発	45分以上
	終結	20時間以内
圧縮強度		20N/mm ² 以上
下地接着強度		0.7N/mm ² 以上
表面接着強度		0.5N/mm ² 以上
長さ変化		0.12%以下
衝撃		割れおよびはがれのないこと。

2.2 間隙充填モルタルの流動性

2.2.1 レオロジー⁷⁾

レオロジーは1929年にE.C.Binghamによって創立された、「変形と流動に関する科学」であるといわれている。材料力学、応用力学の立場からいうならば、レオロジーは各種の異常な力学的性質（非フック弾性、非ニュートン粘性など）に関する力学である。この立場は本質的には現象論の立場であるが、特に工業測定の側からみて、レオロジーの重要な一面である。粘性流体の力学もそれ自体レオロジーではないが、測定法、特に異常粘性の測定の問題は現在でもレオロジーの主要題目である。

クリーム類や各種のペーストは、そのまま放置した場合は固体とおなじに流動しない。しかし、金属と違って小さい力で容易に自由な形に成型することができる。これは、それらが、小さい応力に対しては固体のように弾性を示すが、ある応力 p_0 以上では流動することを示している。このような性質を塑性 (plasticity) といい、限界値 p_0 を降伏値 (yield value) という。塑性流動 (plastic flow) の最も簡単なものは、

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\eta'} (p - p_0) \quad (2-1)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}$: ひずみ速度、 η' : 塑性粘度、 p : ずり応力、 p_0 : ビンガム降伏値の形に書けるものである。これをビンガム塑性流動 (Bingham plastic flow) といい、 p_0 をビンガム降伏値 (Bingham yield value) という。これは、図-2.5に示されるように、 p_0 以下の応力では全く流動せず、 p_0 以上ではニュートン的な流動を示すものである。流動開始後の粘性率 η' を塑性粘度 (plastic viscosity) という。

毛細管中のビンガム流動は図-2.6(a)のようになる。ずり応力の小さい中心軸付近では速度勾配を生じず、全体が一本の栓のようになって押し出されていく。これを栓流 (plug flow) という。栓の半径 r_0 は圧力 p が大きいほど小さくなって、図-2.6(b)に示すニュートン流動の場合の放物線上の速度分布に近づいていく。

軟練りのコンクリートおよびグラウトは、一般的にビンガム塑性流動を行う流体 (ビンガム流体) として近似され、塑性粘度と降伏値を測定することにより、その変形特性を決定できるとされている。

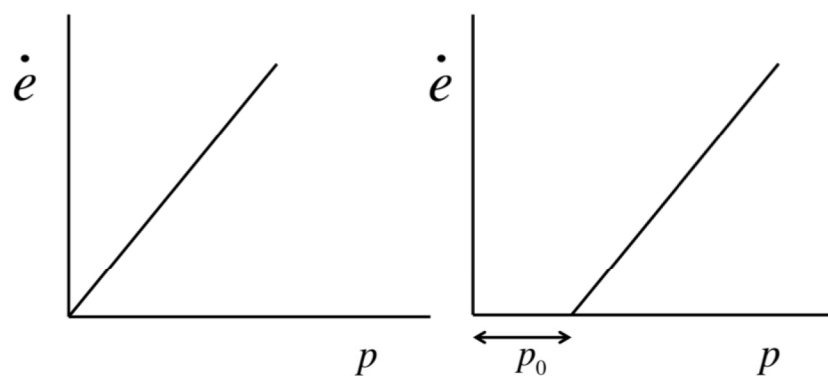
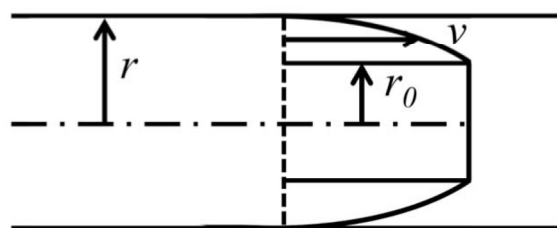
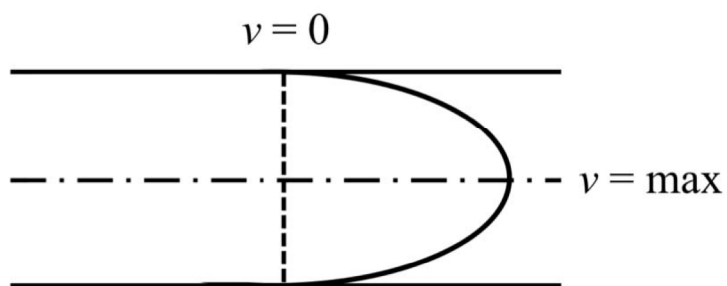


図-2.5 ニュートン流動とビンガム流動



(a) ビンガム流動



(b) ニュートン流動

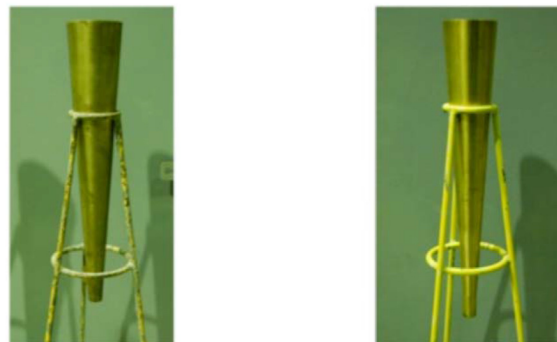
図-2.6 毛細管中の速度勾配

2.2.2 J 漏斗流下試験

(1) 試験概要

一般に、間隙充填モルタルの J 漏斗流下時間と塑性粘度には高い相関が認められる。現場での管理が簡単かつ明確なことから、2013 年のコンクリート標準示方書〔規準編〕において、充填モルタルの流動性試験方法（JSCE-F541）では J14 漏斗、PC グラウトの流動性試験方法（JSCE-F531）では JA 漏斗および JP 漏斗を用いることが提案されている⁸⁾。J14 漏斗と JP 漏斗を図-2.7 に示す。

本研究室で作製されてきた試料の J 漏斗流下時間と塑性粘度の関係を図-2.8 に示す。全年度を通して、J 漏斗流下時間と塑性粘度の間には高い正の相関が認められることから、J 漏斗流下時間は塑性粘度を評価する指標として適切であることがわかる。



(a) J14 漏斗（直管なし） (b) JP 漏斗（直管あり）

図-2.7 J14 漏斗と JP 漏斗

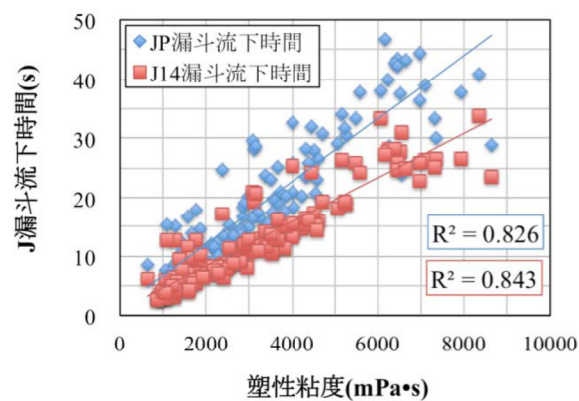


図-2.8 J 漏斗流下時間と塑性粘度

(2) J漏斗流下時間による塑性粘度の算出式⁹⁾

図-2.9 の直管なしの漏斗に示すように、セメントペーストが漏斗内を層流で流下すると仮定すると、せん断面は円錐側面となる。高さ z における任意半径 r の勾配を λ 、漏斗の勾配を Λ とすると、

$$z = \frac{r}{\lambda} = \frac{R}{\Lambda}$$

となる。また、せん断面の内側の試料体積 V は、

$$V = \frac{\pi}{3} r^2 z - \frac{\pi}{3} r_B^2 Z_B = \frac{\pi H}{3} (r^2 + r r_B + r_B^2)$$

となり、せん断面面積 S は

$$S = \int_{Z_B}^z 2\pi r \sqrt{1 + \lambda^2} dZ = \pi \sqrt{1 + \lambda^2} (r + r_B) H$$

となるため、せん断応力 f は

$$f = \frac{\rho V g}{S} = \frac{\rho g (r^2 + r r_B + r_B^2)}{3(r + r_B) \sqrt{1 + \lambda^2}} = \frac{\rho g r_B (b^2 + b + 1)}{3 \sqrt{1 + \lambda^2} (b + 1)}$$

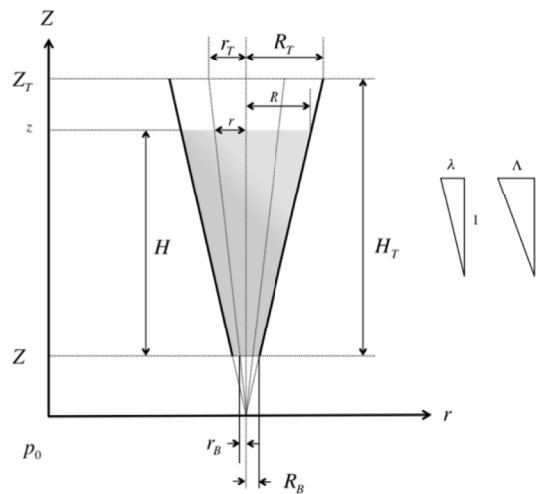


図-2.9 漏斗断面図（直管なし）

となる。ここで、 $b = \frac{r}{r_B}$ である。このせん断応力が降伏値よりも小さい場合は漏斗が閉塞する。

セメントペーストを Newton 流体とし、半径 R の断面の単位時間あたりの流量 Q は、Hagen-Poiseuille の理論を適用すると、

$$\begin{aligned} Q &= a \int_0^R 2\pi r(R^2 - r^2)dr = 2\pi a \int_0^R (R^2 r - r^3)dr \\ &= \frac{\pi a}{2} R^4 = \frac{\pi R^4}{8\eta} \frac{dp}{dz} \end{aligned}$$

となる。圧力勾配は、この式と重力から、

$$\frac{dp}{dz} = \frac{8\eta Q}{\pi R^4} - \rho g$$

となる。よって圧力差 P は、

$$P = \int_{Z_B}^z \left(\frac{8\eta Q}{\pi R^4} - \rho g \right) dZ = (z - Z_B) \left(\frac{8\eta Q}{3\pi R^4} \frac{(z^2 + zZ_B + Z_B^2)}{z^3 Z_B^3} - \rho g \right)$$

となる。しかし、試料の最上端と最下端においては自由表面なので $P=0$ となり、

$$Q = \frac{3\pi R^4 \rho g}{8\eta} \frac{z^3 Z_B^3}{z^2 + zZ_B + Z_B^2}$$

により、 Q が求まる。試料上面の下降速度は、

$$\frac{dz}{dt} = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{3R^2 \rho g}{8\eta} \frac{z Z_B^3}{z^2 + zZ_B + Z_B^2}$$

となるから、流下時間 t は、

$$\begin{aligned}
t &= \int_z^{Z_T} \frac{dt}{dz} dz = \int_z^{Z_T} \frac{8\eta}{3\Lambda^2 \rho g} \frac{z^2 + zZ_B + Z_B^2}{zZ_B^3} dz \\
&= \frac{8\eta}{3\Lambda^2 \rho g} \left[\frac{(Z_T - z)(Z_T + z + 2Z_B)}{2Z_B^3} + \frac{1}{Z_B} \ln\left(\frac{Z_T}{z}\right) \right]
\end{aligned}$$

となる。漏斗が細長い形状の場合、上式の第2項はほとんど0に近くなるため、流下時間は z の2次関数で近似され、初期状態からペーストが流下しきるまでの時間 t_B は $z=Z_B$ から、

$$t_B = \frac{4\eta H_T (R_T + 3R_B)}{3\rho g R_B^3}$$

となる。

ペーストを **Buckingham** 体とみなした場合、せん断応力が降伏値以下となる管軸付近でせん断層流が起こらず、試料が変形せずに移動する栓流現象が起こる。栓流部分の半径を r_y とすると、流量 Q は、

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta} \frac{dp}{dz} \left(1 - \frac{4r_y}{3R} + \frac{r_y^4}{3R^4} \right) = \frac{\pi R^4}{8\eta} \frac{dp}{dz} \alpha$$

となる。ここで、 α は栓流半径 r_y と管の半径 R の関数であるが、これを一定値として扱うと、圧力勾配は

$$\frac{dp}{dz} = \frac{8\eta Q}{\pi \alpha R^4} - \rho g$$

となり、**Newton** 体の場合とよく似た式になる。**Newton** 体と同様に流下時間を求めると、

$$t = \frac{4\eta H_T (R_T + 3R_B)}{3\alpha \rho g R_B^2}$$

となる。これを塑性粘度 η について解くと

$$\eta = \frac{3\alpha \rho g R_B^2}{4H_T (R_T + 3R_B)} t \quad (2-2)$$

となる。

2.2.3 フロー試験

一般に、フロー試験といえば、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に記載されているフロー試験を指す。しかし、間隙充填モルタルのように流動性が非常に高いモルタルでは、衝撃を与えることなく自重により流動するため、15回の落下運動の必要がない。また、その高い流動性のため、フローの値が大きくなり、フローテーブルからこぼれ落ちてしまうことがある。代替案として、ガラス版やアクリル版、鉄板などに筒状の容器を据え、試料を満たした後、自重により流動させ、衝撃を与えずにフローを計測する方法が多くの研究や施工現場において採用されている。

野中ら¹⁰⁾は、フロー試験に用いる容器の相違によるフローへの影響について検討している。JIS R 5210に規定されるフローコーン(内容積344ml:以下JISフロー試験と略記)、JASS 15 M-103「セルフレベリング材の品質基準」に準拠した塩化ビニル製パイプ(内径50mm、高さ51mm、内容積100ml:以下51mm塩ビフロー試験と略記)および建築改修工事監理指針にて提案された塩化ビニル製パイプ(内径50mm、高さ100mm、内容積196ml:以下100mm塩ビフロー試験と略記)について検討している。3種類のフロー試験におけるフローを表-2.3に示す。それぞれ内容積の増加に従いフローも増加しており、異なる配合においても一定の割合で増加している。これらの結果から、野中らは試験可能な範囲かつ流動性の差が認められる広がり方である100mm塩ビフロー試験を採用している。本研究においても、この100mm塩ビフロー試験によるフロー試験を行う。

また、本研究室にて作製された試料のフローとレオロジー定数の関係を図-2.10に示す。図-2.10(a)より、フローと塑性粘度には相関はみられなかったものの、図-2.10(b)より、フローと降伏値の間には高い負の相関が認められる。すなわち、フローは降伏値を表す指標になり得ると考えられる。

表-2.3 3種類のフロー試験におけるフロー

試験方法	試験容器	フロー(mm)		
		配合A	配合B	配合C
JISフロー試験 JIS R 5201	フローコーン 内径:60mm(上)、100mm(下)、高さ:60mm 内容積344ml	309	294	279
100mm塩ビフロー試験 建築改修工事監理指針※	塩化ビニル製パイプ 内径:50mm、高さ:100mm 内容積196ml	258	245	233
51mm塩ビフロー試験 JASS 15 M-103	塩化ビニル製パイプ 内径:50mm、高さ:51mm 内容積100ml	195	185	175

※試験方法の提案であり、管理基準は規定されていない。

一般に、フローはコンクリートやモルタルの降伏値と密接な関係があることが確認されている¹¹⁾。そして、塑性粘度もまた、モルタルのフローに大きく影響を与えるという見解もある^{12), 13)}。そこで、フローの変形をレオロジー定数の観点から検討するため、フロー試験のモデルを図-2.11に示す。モルタルに変形を起こさせる外力はある水平断面 r_x から上の部分の自重 W_x である。変形の進行に伴い断面の面積が増大するので、これに働く最大せん断応力 τ_x は次第に減少し、降伏値 τ_f に等しくなったときに静止する。すなわち、上面から距離 x の位置の水平断面に働く最大せん断応力と降伏値の関係は、

$\tau_x \leq \tau_f$: 流動しない部分

$\tau_x > \tau_f$: $\tau_x = \tau_f$ となるまで流動する部分

となるため、フローは降伏値と密接な関係があると考えられる。

しかし、これは、変形に伴う慣性力の影響を無視しており、実際には、モルタルの変形に伴って、粘性に起因した変形速度を持つことになる。しかし、モルタルとフロー板との摩擦、モルタル中の骨材の噛み合わせ等の影響により減速していく。そして、その加速度が慣性力として働き、フローに影響すると推測される。すなわち、ある程度、変形速度が大きい（粘性が低い）モルタルであれば、塑性粘度もまた、フローに影響を与える可能性があると考えられる。

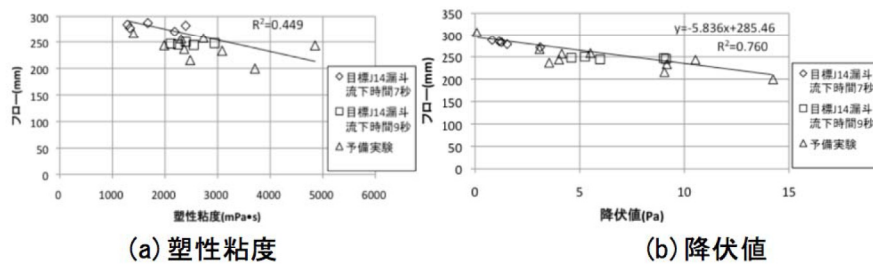


図-2.10 フローとレオロジー定数の関係

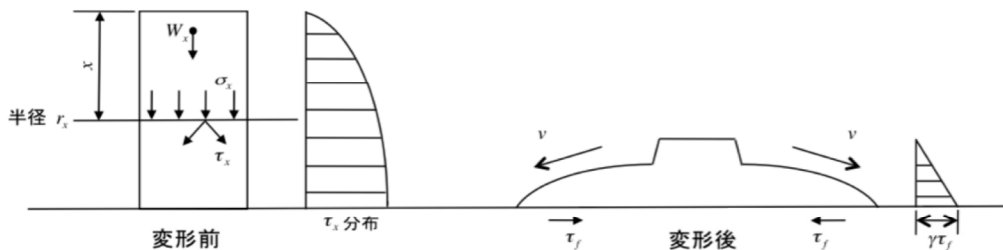


図-2.11 フロー試験のモデル¹⁴⁾

2.2.4 回転粘度計を用いたレオロジー定数の測定

コンクリートやモルタルのレオロジー定数を算出するために用いられる粘度計はいくつか種類があるが、本研究室では、B型粘度計を用いている。

回転粘度計の測定原理を図-2.12に、降伏値の算出方法を図-2.13に示す。図において変速機付きモータが定速回転すると、円筒ロータが試料液中で回転する。この時、円筒ロータには試料液の粘性抵抗によって抵抗トルクが働き、駆動軸の下端と指針軸上端の間に組み込まれたスプリングが、粘性抵抗トルクと釣り合うまでねじられる。このねじれ角度は目盛り板と指針によって読み取れ、試料液の粘性抵抗トルクに比例する。試料液の粘度はこの場合の測定条件、すなわち円筒ロータの形状寸法、スプリングのばね定数、回転速度およびスプリングのねじれ角度から求められる。

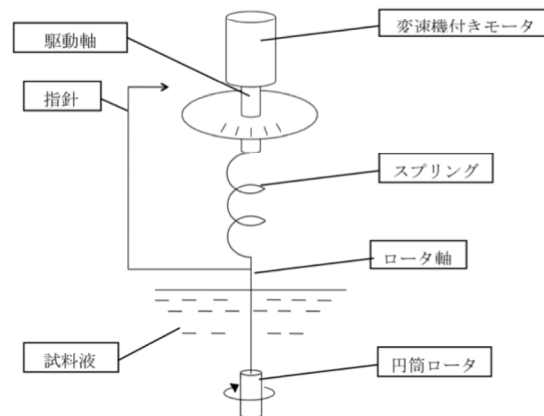


図-2.12 B型粘度計の測定原理

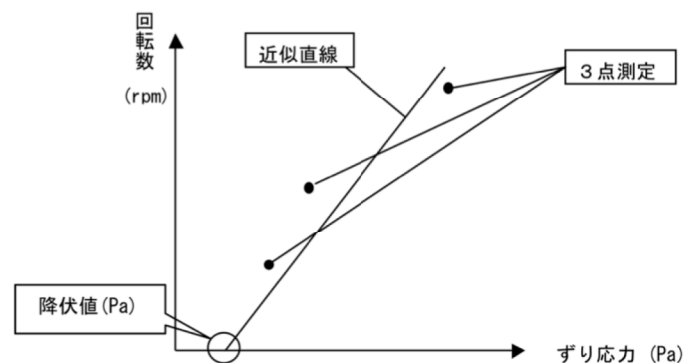


図-2.13 降伏値の算出

2.3 間隙充填モルタルの材料分離抵抗性

2.3.1 間隙充填モルタルにおける材料分離

一般に、コンクリートにおける材料分離はペーストと骨材との分離とセメントと水との分離（ブリーディング）の二つに分けられる。前者は間隙通過性に影響を及ぼし、後者は硬化後に極端な弱部を生じてしまう可能性があるため、材料分離抵抗性を向上させることがコンクリートの品質を高める上で重要である。

本研究で対象とする間隙充填モルタルは、分離低減剤（増粘剤）を添加しており、ブリーディングは生じないものとして考えることとする。また、本研究においては、粒径が 1.2mm 未満の細骨材（小粒径細骨材）と 1.2mm 以上の細骨材（大粒径細骨材）を用いているが、小粒径細骨材はペーストと分離しないと仮定し、大粒径細骨材の分離について着目することとする。

2.3.2 粘性流体中の個体粒子の沈降¹⁵⁾

モルタルの分離は、密度の大きな粒子が沈降することによって生じ、充填性を低下させる一因となる。細骨材の沈降において、骨材に作用する力は、沈降粒子が 1 個でかつ粒子形状を球と仮定すると、図-2.14 の骨材沈降模式図に示す通り、重力による沈降力、粒子に作用する浮力および Stokes の粘性抵抗が作用し、式(2-3)のような運動方程式で表すことができる。また、式(2-4)の積分後の最終速度（定常状態）となった後の速度、式(2-5)ができるだけ小さいほど分離は少なくなると考えられる。モルタルの分離を細骨材粒子の最終速度に起因するものとする、モルタルにおける材料分離は細骨材粒子の密度および粒子径の 2 乗に比例し、ペーストの粘性に反比例することとなる。すなわち、モルタルにおける材料分離を抑制するためには、粒子密度の小さな骨材を使用すること、粒子径を小さくすることおよびペーストの粘度を大きくすることが有効であることが分かる。

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_s \frac{dv}{dt} = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_s g - 6\pi \eta r v - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{cp} g \quad (2-3)$$

r : 粒子半径(m)、 ρ_s : 細骨材の密度(kg/m³)、 v : 細骨材粒子沈降速度(m/s)、

t : 時間(sec)、 g : 重力加速度(m/s²)、 η : 粘性流体の粘性係数(Pa・s)、

ρ_{cp} : セメントペーストの密度(kg/m³)

式(1)を整理して、 t で積分し、初速度なし($t=0$ のとき $v=0$)とすれば、最終速度は次式で表される。

$$v = \frac{2r^2g(\rho_s - \rho_{cp})}{9\eta} \left(1 - e^{-\frac{9\eta}{2\rho_s r^2}t} \right) \quad (2-4)$$

細骨材粒子がペースト中を沈降し、定常状態となったときの最終的な速度は、 $t = \infty$ とすれば、式(2)で表される。

$$v = \frac{2r^2g(\rho_s - \rho_{cp})}{9\eta} \quad (2-5)$$

実際のモルタル中の細骨材は、粒径の異なる複数の粒子の集合体であり、粒径も球でなく、またテクスチャも様々である。したがって、現段階では、式(2-3)を直接的にモルタル中の細骨材粒子へ適用することはできない。しかし、式(2-5)からも明らかなように、細骨材の沈降速度を 0 に近づけることが、骨材の沈降分離を減少させることにつながると考えれば、細骨材密度、粒子径およびペーストの粘度を指標とした配合選定を行うことが合理的であることが分かる。

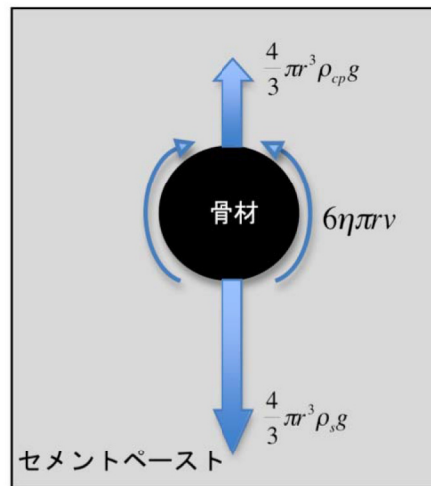


図-2.14 セメントペースト中の骨材の沈降模式図

2.3.3 単独骨材沈降実験による材料分離抵抗性の評価

(1) 概要

モルタルにおける材料分離は、密度の大きい粒子が沈降し、結果的に密度の小さな水が上昇することで引き起こされると考えられる。このように考えると、モルタル中の細骨材粒子の沈降速度を 0 に近づけることが、材料分離を生じさせないこととなり、セメントペースト中における様々な粒径の細骨材粒子の沈降速度を 0 にするために必要なセメントペーストの塑性粘度が把握できれば、材料分離の定量的な評価が可能になるといえる。しかし、実際のモルタル中の細骨材は粒径の異なる複数の粒子の集合体であり、粒径は一様ではなく、また粒子表面のテクスチャも様々である。現段階では、定量的な評価は困難であるが、細骨材の沈降速度を 0 に近づけることが、骨材の沈降分離を減少させることにつながるものと仮定すると、細骨材密度、粒子径およびセメントペーストの粘度を指標とした検討を行うことが合理的であることが分かる。

(2) 実験方法

単独骨材沈降実験の試験方法を以下に示す。

- 1) 水に増粘剤を除々に投入しながら、ハンドミキサーを用いて攪拌し、水の粘度を増加させる。この時、水の粘度は、材料分離抵抗性試験で材料分離していないと考えられる配合における大粒径細骨材を除くモルタルの粘度まで増加させる。
- 2) その粘性流体(水+増粘剤)をメスシリンダーに移し、大粒径細骨材 1 個を初速度が 0 となるように、静かに細骨材を投入し、沈降させる。
- 3) 大粒径細骨材が一定の距離を沈むのに要する時間を測定し、沈降速度を算出する。すなわち、その沈降速度であれば材料分離が生じないと仮定すると、その細骨材より粒径の大きい細骨材が、その沈降速度になるために必要な粘性流体の粘度が式(2-4)より算出できる。

(3) 実験結果

この実験での考え方のフローを図-2.15に、実験概念図を図-2.16に示す。以降、このフローに基づいて、結果を記述する。

- 1) 今回用いた試料(モルタル)を小粒径細骨材のみを含むモルタルと大粒径細骨材の2相材料として扱うこととする。小粒径細骨材のみを含むモルタルの塑性粘度は $1240\text{mPa}\cdot\text{s}$ であったため、水に増粘剤を加え、その粘度まで増加させた。
- 2) その粘性流体中に粒径 1.2mm の細骨材を投入し、沈降速度を測定した。その結果、 $1240\text{mPa}\cdot\text{s}$ の粘性流体中を粒径 1.2mm の細骨材が沈降する速度は 0.9mm/s であった。
- 3) 細骨材が、粘性流体中を沈降する速度が、 0.9mm/s であれば材料分離しないと仮定する。この仮定は、材料分離抵抗性試験で、他の骨材の干渉作用等が生じることを考慮すれば、材料分離の傾向が見られなかったということである。
- 4) 粒径 1.2mm 、 1.7mm 、 2.0mm 、 2.5mm 、 2.8mm 、 5.0mm の骨材が、その沈降速度になる塑性粘度を、式(2-4)より算出する。必要なパラメータの詳細と結果を表-2.4に示す。

表-2.4 各粒径の骨材の沈降速度が 0.9mm/s となる塑性粘度

W/C	大粒径細骨材 の密度(g/cm^3)	大粒径細骨材の寸法(mm)							
		1.2	1.7	2.0	2.5	2.8	3.3	4.0	5.0
0.5	2.45	532	1068	1478	2310	2898	4025	5914	9240
	2.54	611	1226	1696	2650	3325	4618	6785	10602
	2.69	741	1488	2059	3218	4036	5606	8237	12870
0.4	2.45	429	862	1193	1864	2338	3248	4772	7456
	2.54	508	1019	1411	2204	2765	3841	5643	8817
	2.69	639	1281	1774	2771	3476	4829	7095	11085
0.3	2.45	300	601	832	1301	1631	2266	3330	5202
	2.54	378	759	1050	1641	2058	2859	4201	6564
	2.69	509	1021	1413	2208	2770	3847	5653	8832

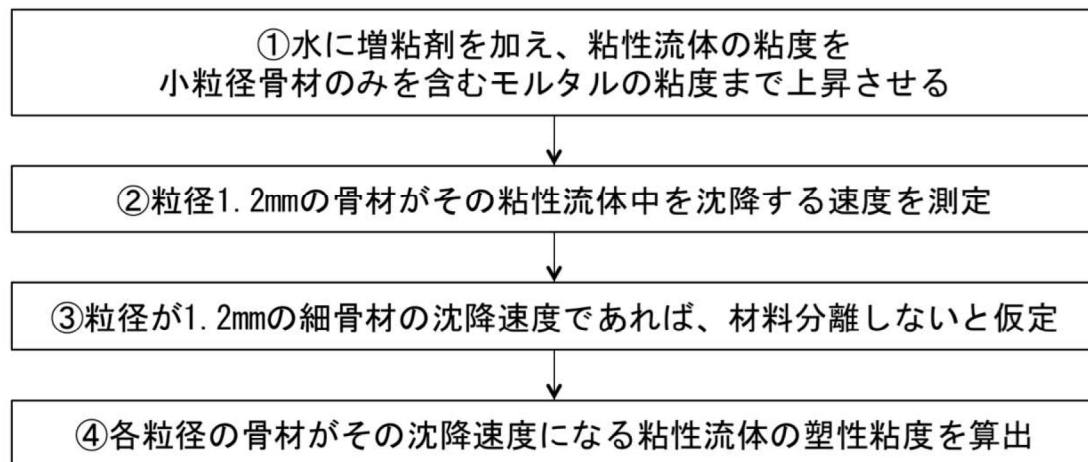


図-2.15 単独骨材沈降実験の考え方のフロー

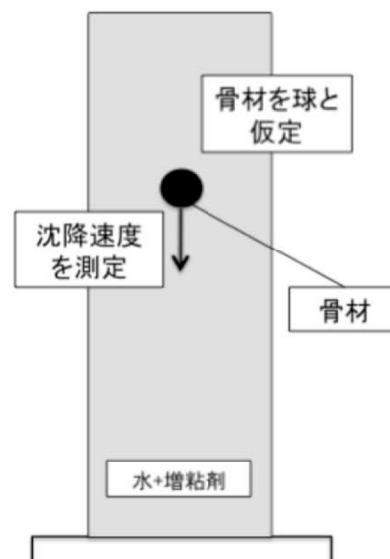


図-2.16 単独骨材沈降実験概念図

2.3.4 材料分離抵抗性評価手法

(1) 塩化ビニルパイプを用いた試験方法¹⁶⁾

間隙充填モルタルに求められる充填性を確保するためには、流動性と材料分離抵抗性の両者のバランスが適切に設定されなければならない。これらは、一方を高めれば他方が低下するものが少なくない。現在、プレミックス材は、ブリーディングの発生を抑えたノンブリーディングタイプの材料を使用することが標準となった。そのため、グラウト材は微妙なバランスの下で配合が設計されており、施工の条件や目的に合わせて、それらを調整する余地はほとんど残されていないのが現状であった。

本研究室においても、材料分離抵抗性の評価に取り組んでいる。その研究報告は以下の通りである。

材料分離が間隙充填における閉塞に影響を及ぼすとの考えから鉛直方向の材料分離状況を把握する試験を行った。試験手順は、

- 1) 図-2.17のように塩化ビニルパイプを組み合わせ垂直に立てる。
- 2) モルタル試料を上面まで注ぎ 30 分間 静置する。
- 3) 30 分後 A、B、C 各部分の試料を分けて取り出し、容積と質量を測定し、単位容積質量を算出する。
- 4) 質量を測定した試料を 0.075mm のふるいの上でよく水洗いしセメントペーストを落して乾燥させる。
- 5) 乾燥させた試料を 5、2.5、1.2、0.6、0.3、0.15、0.075mm のふるいにかけて、ふるい分けを行う。
- 6) 得られた試験データから粒度分布、粗粒率を算出し材料分離の有無を評価する。

過去の実験において、粗粒率、密度ともに、各層ごとの顕著な差は認められず、材料分離は確認されなかった。これは、試料の骨材が細かいこと、モルタル試料を注いでから取り出すまでの前置き時間が短いこと、および装置の管径が小さいことなどが原因であると考えられたので、次年度において、これらの原因を考慮し、改めて試験を行い、材料分離抵抗性を評価した。

しかし、改良後も顕著な結果を得られなかったため、次項に示す J14 漏斗を用いた試験方法が考案された。

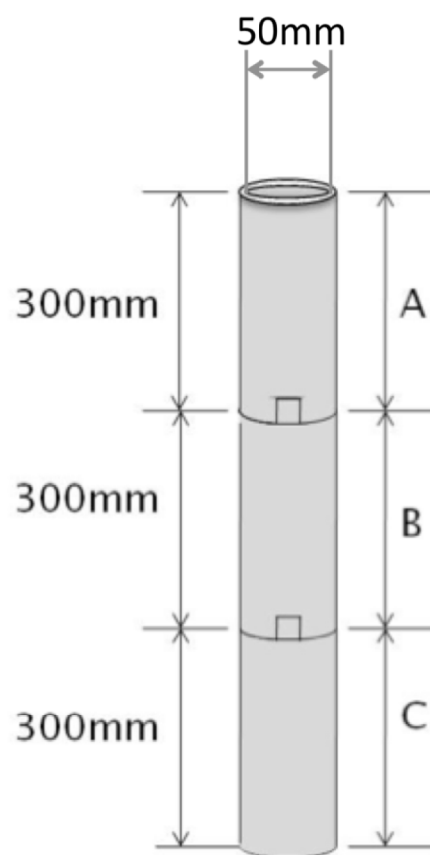


図-2.17 塩化ビニルパイプを用いた材料分離抵抗性試験装置

(2) J14 漏斗を用いた試験方法¹⁷⁾

J14 漏斗を用いた材料分離抵抗性試験の概要を図-2.18 に示す。流出口を指で塞いだ状態で、漏斗内に試料を満たし、1 分間静置する。その後、(A)流出初期の試料 200ml と、(B)残りの 430ml に分けて採取し、(A)、(B)それぞれの試料に対して洗い分析を行い、各試料に含まれる大粒径細骨材の絶乾状態での質量を求める。

漏斗内の試料が分離しないで、大粒径細骨材が均等に分布していると仮定すれば、それぞれの試料に含まれる大粒径細骨材の質量比はそれぞれの試料の体積比と等しくなるはずである。このことから、以下の概念図のように理想状態との比較から分離抵抗指数を定義し、これを材料分離抵抗性の指標とする。

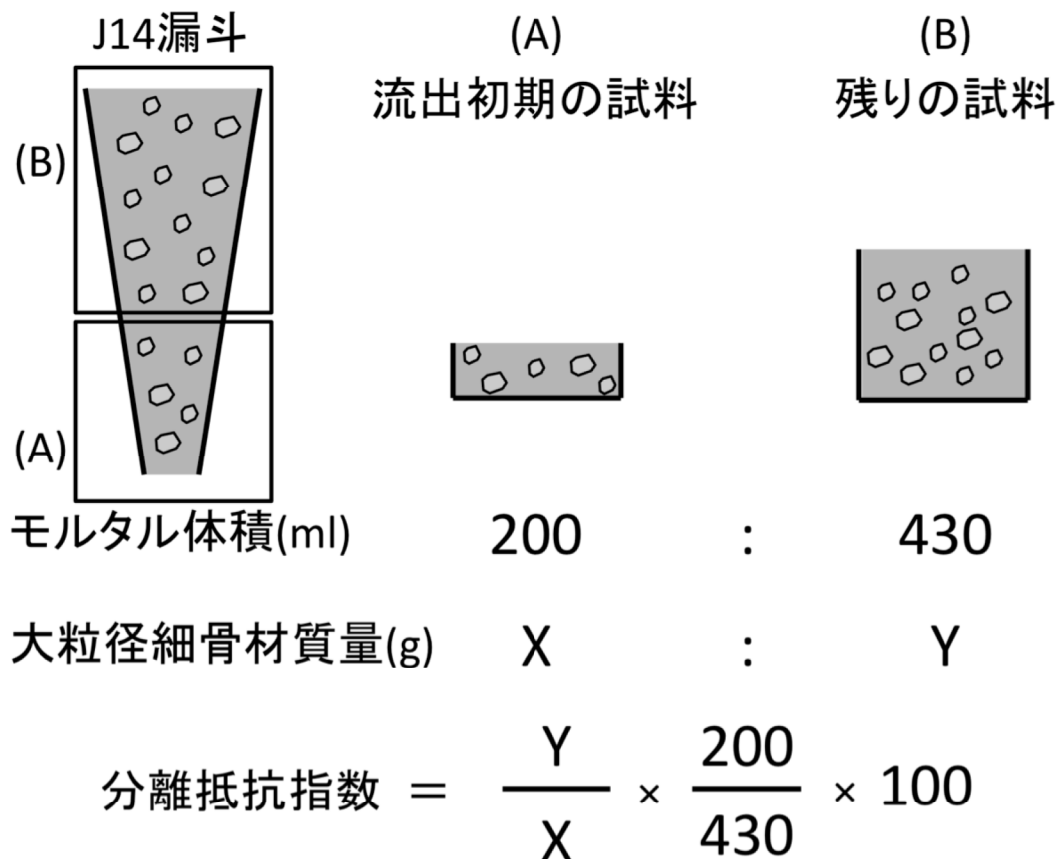


図-2.18 J14 漏斗を用いた材料分離抵抗性試験概略図

2.4 間隙充填モルタルの充填性

2.4.1 高流動コンクリートの間隙通過性¹⁸⁾

本研究で対象としている間隙充填モルタルは、広義で解釈すれば高流動コンクリートと似た性質をもつものであると考えられる。粒径の大きい骨材を粗骨材、粒径の小さい骨材を細骨材と見なせば、その範囲は限定的ながら、高流動コンクリートの充填性についての研究を適用することができると考えられる。

藤原らは、高流動コンクリートが間隙において閉塞するメカニズムモデルを構築し、そのモデルを検証するため、種々の要因を変化させた高流動コンクリートについて間隙通過実験を行っている。

コンクリートが間隙において閉塞を起こす主要因は鉄筋間での粗骨材の架橋（アーチング）によるものと考えられる。このような架橋は図-2.19 に示す挙動で説明され、粗骨材の最大粒径に対して、間隙幅がそれ以上大きくなると架橋の危険性が大きく低下する架橋限界間隙幅が存在すると推定される。粗骨材を半径 r の単一粒径を持った粒群と仮定すると、安定した架橋が起こりうる最大鉄筋間隔は、図-2.20 に示すように一方向配筋の場合には $(2+\sqrt{3})r$ 、クロス配筋の場合には $(2+\sqrt{2})r$ となる。各粒径に対して架橋限界間隙幅を求めたものを表-2.5 に示す。最大寸法 20mm の粗骨材を用いたコンクリートにおいては、一方向配筋で鉄筋純間隔約 40mm、クロス配筋で純間隔 50mm を超えると、架橋による間隙部での

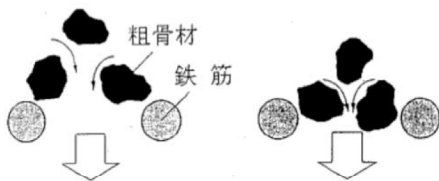


図-2.19 鉄筋間通過時の粗骨材の挙動

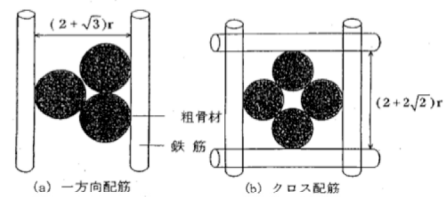


図-2.20 安定した架橋構造となる
最大鉄筋間隔

表-2.5 最大寸法に対する架橋限界間隙幅

最大寸法 (mm)	架橋限界間隙幅 (mm)	
	一方向配筋	クロス配筋
	$(2+\sqrt{3})r$	$(2+2\sqrt{2})r$
10	18.7	24.1
20	37.3	48.3
40	74.6	96.6

閉塞の危険性が大きく低下すると推測される。

また、粗骨材の架橋は粗骨材間距離が十分とられていれば起こらないものと考えられ、間隙部において粗骨材体積濃度 $X_V(\%)$ がある一定値以下であれば粗骨材間の接触が起こらず、架橋も起こらないと推測される。鉄筋間隙部通過による X_V の変化の様子を図-2.21 に示す。間隙部において壁効果¹⁹⁾ によって X_V が増大し、粗骨材間での架橋が起こった場合に閉塞することが考えられる。

加えて、架橋の危険性に影響する要因としては粗骨材の形状が挙げられる。粗骨材の形状が球に近くなるほど回転スペースに必要なモルタル量は少なくなる。 X_V が同じ条件であるなら、粗骨材の形状が球に近いほど、架橋する危険性は低下すると考えられる。粗骨材を長軸 $2a$ 、短軸 $2b$ の楕円体としたときに計算される (b/a) を用いて、回転スペースに必要なモルタル量とその空隙を埋めるモルタルの量から X_V の限界値 X_{Vt} を導くことができる。 X_{V0} に間隙部における増分 X_S を加えた $X_{V0} + X_S$ が X_{Vt} 以下であるならば、粗骨材が回転運動を起こしても接触する可能性は低いことになる。

また、粗骨材の形状を画像処理による円度 (4π 面積/周囲長²⁾) でも評価している。円度の異なるコンクリートを同一の条件で間隙通過試験を行った結果を図-2.22 に示す。円度 0.80 近辺を境に閉塞と通過に分かれる結果となり、粗骨材の形状が間隙通過性に大きな影響を与えていることが分かる。

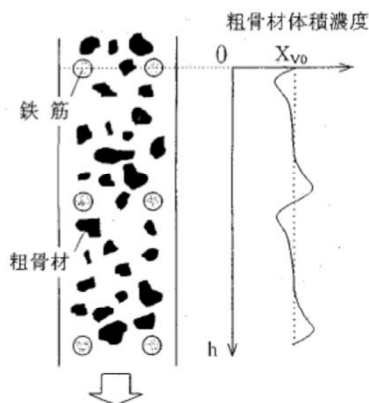


図-2.21 鉄筋間隙通過による粗骨材
体積濃度の変化

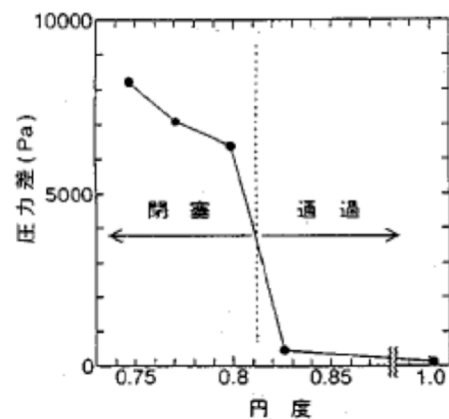


図-2.22 粗骨材の円度と圧力差の関係

以下に高流動コンクリートの間隙部における閉塞メカニズムモデルの検証結果をまとめる。

- (1) 鉄筋間等の間隙部での閉塞は、粗骨材の架橋が原因であり、使用する粗骨材の最大寸法に対して架橋限界間隙幅が算出できる。
- (2) 流動中の高流動コンクリートは鉄筋間隙等の間隙部で粗骨材体積濃度が増大し、粗骨材間での架橋が起こった場合に閉塞する。
- (3) 間隙部における粗骨材体積濃度の増大は壁効果によるものと推定される。
- (4) 最大寸法 20mm の粗骨材を用いた場合、粗骨材の架橋は、間隙幅が一方向配筋で約 40mm、クロス配筋で約 50mm 以下の条件で起こる確立が高いことが上記のメカニズムモデルからも明らかとなった。

また、間隙充填モルタルに用いられている細骨材について架橋限界間隙幅を算出したものを表-2.6 に示す。鋼板巻立て工法における間隙を一方向配筋と考えれば、例えば最大寸法 2.5mm の細骨材を使用した際は間隙幅が 5mm を超えると、架橋による閉塞の危険性が大きく低下すると推測される。間隙充填モルタルにおいて、上記のメカニズムをそのまま適用することはできないが、充填性を評価する上で、細骨材の最大寸法に関する検討は不可欠であることが分かる。

表-2.6 最大寸法に対する架橋限界間隙幅（間隙充填モルタル）

最大寸法 (mm)	架橋限界間隙幅 (mm)	
	一方向配筋	クロス配筋
	$(2 + \sqrt{3})r$	$(2 + 2\sqrt{2})r$
1.2	2.2	2.9
2.5	4.7	6.0
5.0	9.3	12.1

2.4.2 高流動コンクリートの充填性試験²⁰⁾

高流動コンクリートが満足すべき自己充填性は、そのレベルに応じて3種類に分類されている。3種類のランクに相当する対象構造物ならびに構造物の条件の目安を表-2.7に示す。構造物の条件は、構造物中で最小となる鉄筋あるいはその他の鋼材間のあきで分類している。なお、条件が最も厳しいランク1に相当する構造物の条件を、鋼材量で表すと 350kg/m^3 超である。同様に、ランク2は鋼材量 $100\sim 350\text{kg/m}^3$ 、ランク3は 100kg/m^3 未満が目安となる。大半の構造物はランク2の範疇に属する。

自己充填性のランクの判断は、鋼材量よりも鋼材の最小あきを優先させる。これは、鋼材のあき部分で粗骨材の架橋により閉塞する可能性が高く、細径の鉄筋で鋼材量が少なくても鉄筋のあきが小さい方が、太径の鉄筋で鋼材量が多くても鉄筋のあきが大きい場合よりも充填性が低下するためである。

実際に高流動コンクリートを用いる際は、その要求性能に応じてランクを選定する。各ランクに対応した自己充填性の評価方法としては、充填の様子が目視で確認できる、JSCE-F511「高流動コンクリートの充填性試験方法（案）」²¹⁾を用いており、その場合の要求性能を満足する特性値を表-2.8に示す。

JSCE-F511「高流動コンクリートの充填性試験方法（案）」の試験装置および流動障害の概要を図-2.23に示す。ランク1はかなり密な配筋状態の構造物を対象としているため、充填性は鉄筋間隔の狭い障害条件R1（鉄筋のあき 35mm ）で確認することとしている。しかし、これまでの例では、ランク1に相当する高密度な配筋状態の構造物に高流動コンクリートを流し込む際には、充填性にとって厳しい箇所を部分的に取り出したモデル試験体を用いて充填を確認することが多い。充填試験の結果だけではランク1の構造物に対する自己充填性を評価することは難しい。このため、必要に応じて、モデル試験体を用いた充填確認試験を行うことが望ましい。

表-2.7 高流動コンクリートの自己充填性のランクと構造物の条件

自己充填性のランク	1	2	3
鋼材の最小空き(mm)	35～60程度	60～200程度	200程度以上
主な対象構造物	高密度配筋部材、 複雑・異形型枠を使用した構造物	通常のRC構造物 や複合構造物	配筋量の少ないマ スコンクリート構 造物や無筋構造物

表-2.8 自己充填性のランクと性能評価方法

評価指標		自己充填性のランク		
		1	2	3
高流動コンクリートの充填試験 (JSCE-F 511-2012)	障害条件	R1	R2	障害なし
	充填高さ(mm)	300以上	300以上	300以上

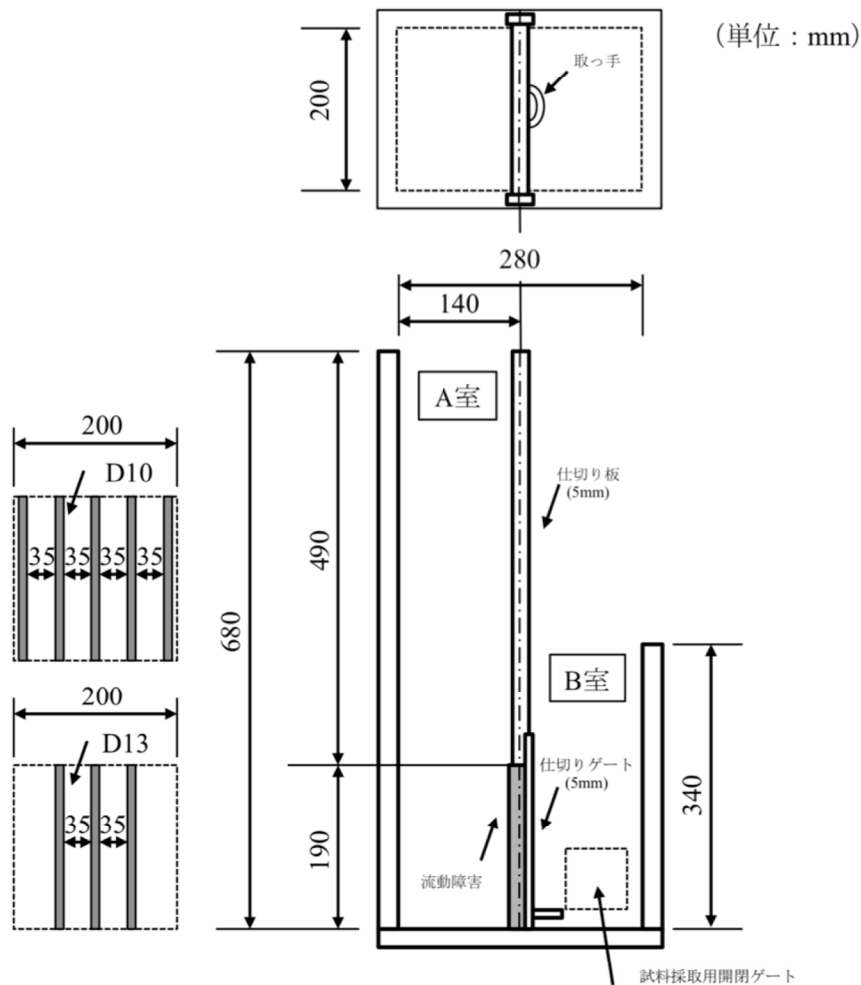


図-2.23 充填試験の形状および流動障害

2.4.3 Zingg による粒子形状の区分

ふるい分け試験による細骨材の粒度分布測定においては、ふるい上で粒子を激しく振とう攪拌する。この場合、粒子はあらゆる方向に向きを変え、重力によってふるい目をとおり、落下しようとする。このように考えると、図-2.24 に示す Zingg の粒子形状の定義²²⁾に従えば、粒子形状が棒状や葉片状の場合、ふるい分け試験においては、粒子の短径または中間径が支配的となって、粒度分布が測定されているものと推察される²³⁾。

したがって、細骨材の粒径が間隙よりも小さい場合でも、長径が支配的となれば架橋現象を生じる原因となる。また、細骨材の粒径が間隙よりも大きい場合でも、短径が支配的となれば間隙を通過することとなる。

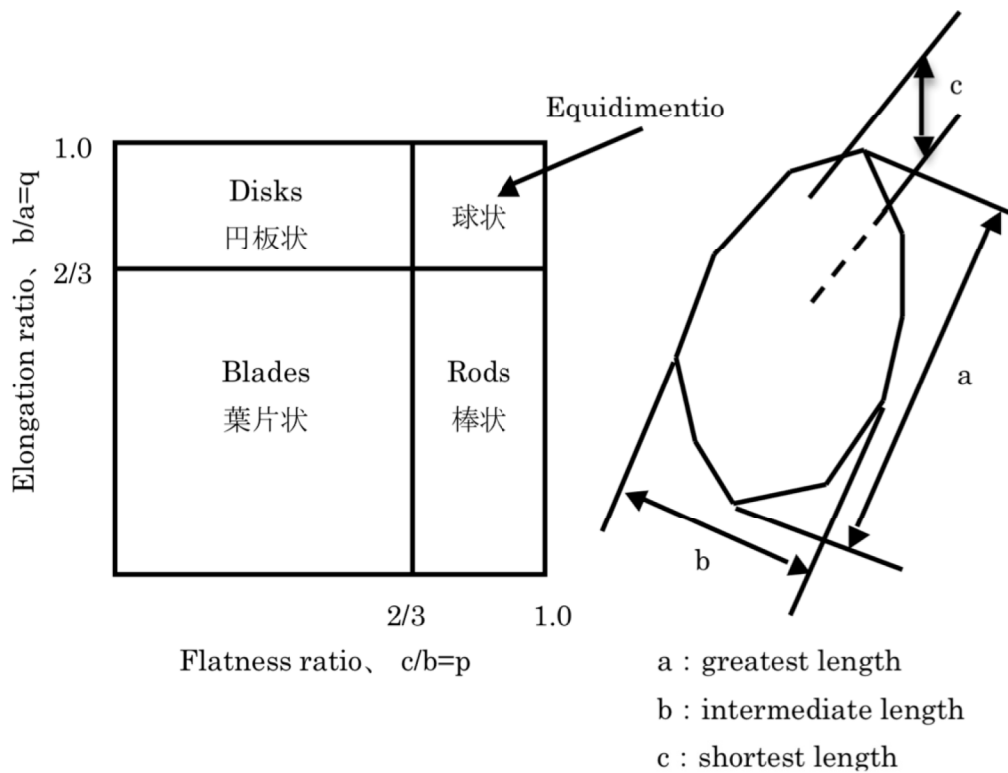


図-2.24 Zingg による粒子形状の区分

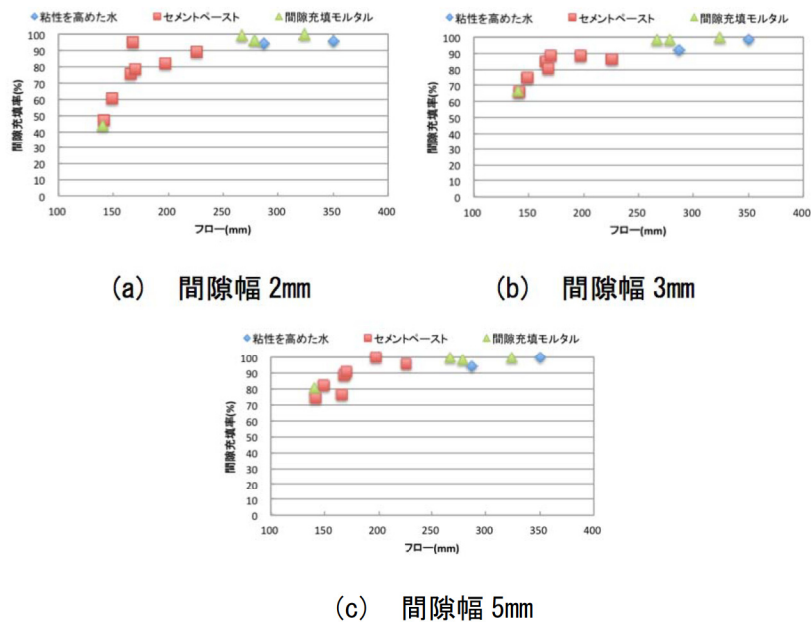
2.4.4 昨年度までの検討

(1) 流動性が間隙充填に及ぼす影響

本研究室では、流動性を評価する試験として、J漏斗流下時間、フロー、フロー到達時間を指標としている。また、流動性を語る上で重要なレオロジー定数に関しては、B型回転粘度計を用いて測定している。

J漏斗流下時間は塑性粘度と高い相関にあるが、骨材の影響を考慮すると、間隙幅が狭いほど精度が低下してしまう。加えて、品質管理におけるJ14漏斗流下時間の規格値に収まる試料が未充填であったことや、規格値から大きく外れていながらも高い充填率を示している試料が存在する。また、J漏斗流下時間が等しくてもフローの異なる試料は作製可能である。このことから、J漏斗試験のみでは充填性を評価することはできないことがわかる。

粒径1.2mm以上のものを含んでいない試料におけるフローと間隙充填率の関係を図-2.25に示す。フローが大きくなるにしたがって、間隙充填率は高くなる傾向があり、充填性の評価には簡易テーブルフロー試験を用いることが適当であるといえる。また、この検討で用いられた試料においては、間隙幅によらずフローが250mm以上であれば、良好な充填性を示すことが明らかとなった。

図-2.25 フローと間隙充填率の関係¹⁷⁾

(2) 材料分離抵抗性が間隙充填に及ぼす影響

本研究室では、材料分離抵抗性を定量的に評価するため、塩化ビニルパイプを用いた試験や、J14 漏斗を用いた試験を行っている。材料分離抵抗性は塑性粘度が支配的であると考えられるが、降伏値の影響も無視することはできない。

J14 漏斗流下時間を 7 秒および 9 秒に統一した場合のフローと間隙幅 2mm における間隙充填率の関係を骨材粒径ごとに図-2.26 に示す。骨材粒径の影響がある場合、フローが 280mm 程度まで大きくなると、骨材粒径の大きさによらず充填可能となってしまう。そのため、粒径ごとに間隙充填率に差が見られる、フロー250mm 程度に統一した試料を作製し、流動性、特に塑性粘度が材料分離抵抗性に及ぼす影響に限って評価を行った。

フローを一定とした場合、間隙充填に影響する要因は塑性粘度および骨材粒径である。塑性粘度と J 漏斗流下時間は相関関係にあるが、骨材粒径を考慮した場合、その精度は低くなる。そこで、骨材の影響が少ないフロー到達時間に注目して検討を行った。

フロー到達時間と間隙充填率との関係を図-2.26 に示す。200mm フロー到達時間と 250mm フロー到達時間は異なる性状を評価しており、200mm フロー到達時間は初期流動速度を表していると考えられ、最大粒径が間隙幅より大きくても、初期流動速度が大きければ、架橋を生じさせずに間隙を通過し、充填性が向上されると推察される。

また、充填に必要な材料分離抵抗性を持つため、試料の塑性粘度を一定以上確保することも必要である。この場合、塑性粘度を 250mm フロー到達時間で評価することが望ましい。

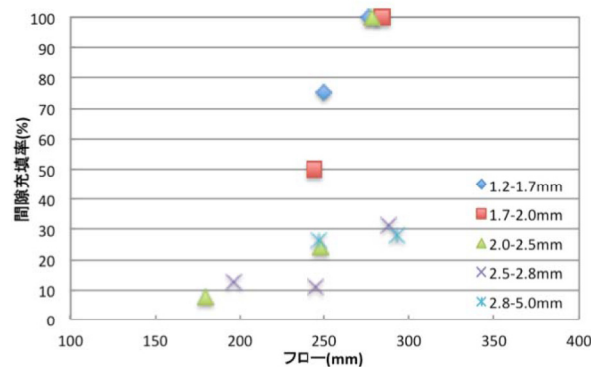
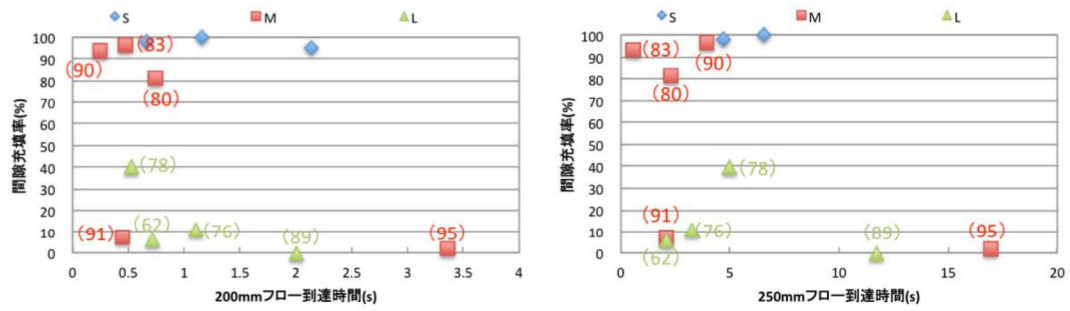
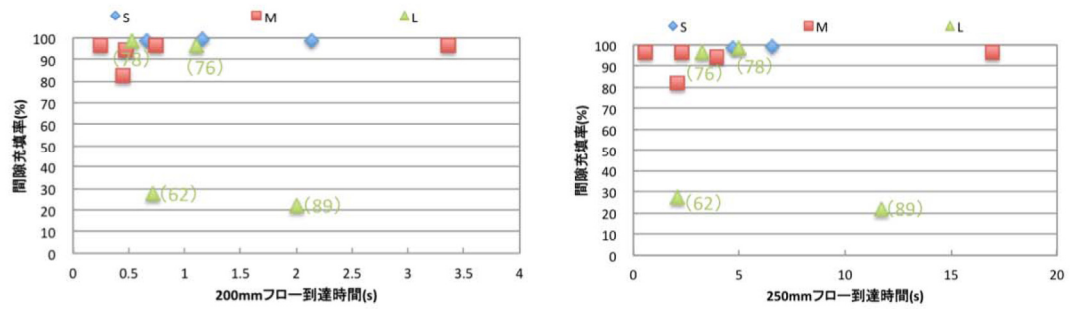


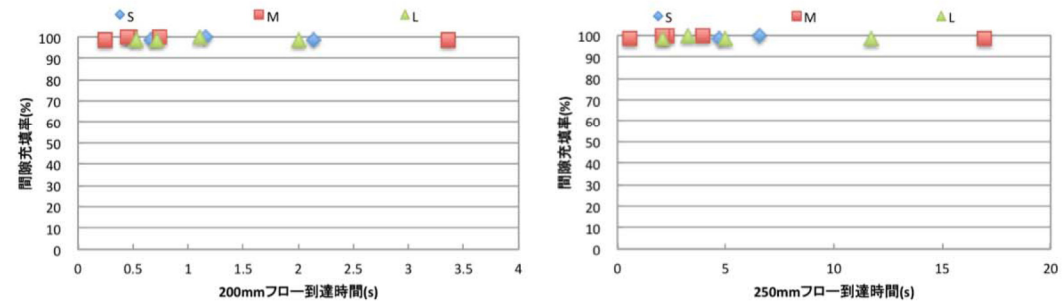
図-2.26 フローと間隙幅 2mm における間隙充填率の関係



(a) 間隙幅 2mm



(b) 間隙幅 3mm



(c) 間隙幅 5mm

(注) 括弧内の数字は分離抵抗指数を示している。

図-2.27 200mm および 250mm フロー到達時間と間隙充填率の関係¹⁷⁾

2.5 今年度の検討課題

昨年度の検討結果のまとめを表-2.9に示す。フローを250mm程度に統一した時、間隙幅と骨材粒径の関係から、最適なフロー到達時間を算出することができた。しかし、昨年度の検討では、水セメント比を変化させることで、塑性粘度を変化させ、影響を検討していた。そのため、見かけの密度が試料ごとに異なり、純粋に流動性の観点から適切な評価が行えていなかった可能性が高い。

そこで、今年度は水セメント比を0.4で一定とし、材料構成を変化させず、混和剤の添加量のみを変化させることで、フローを250mm程度に統一した試料を作製する。以下に今年度の主な検討課題を示す。

- (1) 小粒径細骨材のみを用いた試料で各試験を行い、骨材粒径の影響のない状態で間隙充填モルタルの流動性が充填性に与える影響について検討する。フローを250mm以上としても、壁面との摩擦抵抗を考慮すれば、塑性粘度を一定値以下にする必要があると考えられる。塑性粘度の異なる試料を作製し、塑性粘度と充填率の関係を求めることで、流動性の観点から間隙幅に応じた塑性粘度の上限となる値を定める。
- (2) 小粒径細骨材と大粒径細骨材を合わせた試料で各試験を行い、塑性粘度が低い場合に生じる架橋現象を再現することで、材料分離抵抗性の観点から間隙幅に応じた塑性粘度の下限となる値を定める。
- (3) 昨年度までは、骨材の沈降の程度を比較することで材料分離抵抗性を評価していた。今年度より、試料の水平方向の移動における骨材の分布に着目し、両者を合わせて材料分離抵抗性を評価する。
- (4) 現場における充填性の簡易評価試験の確立のため、各種試験の結果と充填性の関係性を明確にする。

表-2.9 昨年度の検討の結果

2mm		最大粒径/間隙幅	フロー (mm)	200mmフロー 到達時間 (s)	250mmフロー到 達時間 (s)	充填
粒径 (mm)	S (1.2未満)	0.60	250	-	-	○
	M (1.2～2.5)	1.25	250	1秒未満		○
	L (2.5～5.0)	2.5	250			×
3mm		最大粒径/間隙幅	フロー (mm)	200mmフロー 到達時間 (s)	250mmフロー到 達時間 (s)	充填
粒径 (mm)	S (1.2未満)	0.40	250	-	-	○
	M (1.2～2.5)	0.83	250	-	-	○
	L (2.5～5.0)	1.67	250	1秒	3～5秒	△
5mm		最大粒径/間隙幅	フロー (mm)	200mmフロー 到達時間 (s)	250mmフロー到 達時間 (s)	充填
粒径 (mm)	S (1.2未満)	0.24	250	-	-	○
	M (1.2～2.5)	0.5	250	-	-	○
	L (2.5～5.0)	1	250	-	-	○

参考文献

- 1) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧(第二版)、技報堂、pp.495-501、1996
- 2) 社団法人セメント協会：セメント系補修・補強材料の基礎知識(第2版)、p.7、p.61、2011
- 3) 社団法人日本コンクリート工学協会：充填材の品質評価研究委員会中間報告書、p.14、1992
- 4) 財団法人建築保全センター：建築改修工事監理指針平成19年度下巻(国土交通省大臣官房官庁営繕部監修)
- 5) NEXCO：NEXCO試験方法第3編コンクリート関係試験方法、JHS 312-1999「無収縮モルタル品質管理試験方法」、pp1-7、2010
- 6) 社団法人日本建築学会：建築工事標準仕様書、JASS 15 M-103「セルフレベリング材の品質基準」
- 7) 中川鶴太郎：レオロジー、岩波書店、1973、pp.1-9、p74、pp.94-95
- 8) 社団法人土木学会：2013年制定 コンクリート標準示方書[規準編] JIS規格集、2013
- 9) 社団法人セメント協会：流動性研究会報告書、pp.51-53、2003
- 10) 野中英、佐藤孝一、金森誠治：高粘性モルタルの流動性試験方法に関する基礎的実験、土木学会第62回年次学術講演会講演概要集、V-203、pp.405-406、2007
- 11) 角田忍、馬場隆、長淵強：高流動充填モルタルのレオロジー評価、セメント・コンクリート論文集、No.52、pp.540-544、1998
- 12) 中西博、横山滋、柳田力：フレッシュコンクリートにおけるモルタル部のレオロジー特性と流動性について、コンクリート工学年次論文報告書、Vol.21、No.2、pp.313-318、1999
- 13) 小阪義夫：最新コンクリート技術、森北出版、pp.32-34、1990
- 14) 村田二郎：コンクリート技術100講(改訂版)、山海堂、pp.99-101、1993
- 15) 上野敦：副産物を用いたコンクリートの品質向上に関する研究、東京都立大学、博士論文、pp.129-130、2005
- 16) 石山陽介、宇治公隆、上野敦、大野健太郎：間隙充填モルタルの充填性に影響を及ぼす要因とその評価手法、コンクリート工学年次論文集、Vol.33、No.1、pp.1367-1372、2011
- 17) 出口慎太郎、宇治公隆、上野敦、大野健太郎：間隙充填モルタルの充填性に及ぼす影響要因、コンクリート工学年次論文集、Vol.36、pp.1528-1533、2014

- 18) 藤原浩己、長瀧重義、大即信明、堂園昭人、高流動コンクリートの間隙通過性に関する研究、土木学会論文集、No.550、V-33、pp23-32、1996
- 19) 三輪茂雄：粉体工学通論、日刊工業新聞社、pp.37-39、1991
- 20) コンクリートライブラリー136 号 高流動コンクリートの配合設計・施工指針 [2012 年版]、pp.26-31、2012
- 21) 社団法人土木学会：2013 年制定 コンクリート標準示方書 [規準編] JIS 規格集、2013
- 22) Zingg,T. : Beitrag zur Schotteranalyse,Schweiz.Mineral.Petrog.Mitt、15、pp.39-140、1935
- 23) Powers,T.,C. : The Properties of Fresh Concrete,John Wiley&Sons,inc.、pp.14-18、1968

第3章 塑性粘度の相違が充填性に及ぼす影響

3.1 はじめに

第3章は、間隙充填モルタルの流動性が間隙充填性に及ぼす影響を検討したものである。

2.5 今年度の検討課題でも述べたとおり、小粒径細骨材のみを含む間隙充填モルタルは、フローを 250mm 以上確保すれば 2mm～5mm の間隙を充填できることがわかった。しかしながら、昨年度の研究では水セメント比を変化させることで塑性粘度を変化させたため、見かけの密度が試料ごとに異なり、適切な評価が行えていなかった可能性がある。そこで、本検討では水セメント比を 0.4 で一定とし、材料構成を変化させず、混和剤の添加量のみを変化させることで、フローを 250mm 程度に統一した試料を作製した。

しかし、フローを 250mm 以上としても、壁面との摩擦抵抗を考慮すれば、塑性粘度を一定値以下にする必要があると考えられる。フローを 250mm 程度に統一した塑性粘度の異なる試料を作製し、塑性粘度と充填率の関係から、各間隙幅に対して、塑性粘度の上限となる値を定めることが本検討の目的である。

塑性粘度の異なる試料のフローを 250mm 程度に統一するためには、混和剤の添加量の調整が重要となる。高性能 AE 減水剤と分離低減剤（以下、増粘剤）がモルタルの流動性に及ぼす影響を図-3.1 に示す。宮本ら¹⁾は、高性能 AE 減水剤添加量および増粘剤添加量が、その流動特性に及ぼす影響について検討を行っている。この検討から、増粘剤の添加量を増やすと、降伏値と塑性粘度のどちらも値が大きくなり、高性能 AE 減水剤の添加量を増やすと、降伏値の値が小さくなるが、塑性粘度の変化量は小さいことがわかる。すなわち、高性能 AE 減水剤と増粘剤の添加量を調整することで、降伏値を一定値以下に維持したまま塑性粘度を増減させることが可能である。

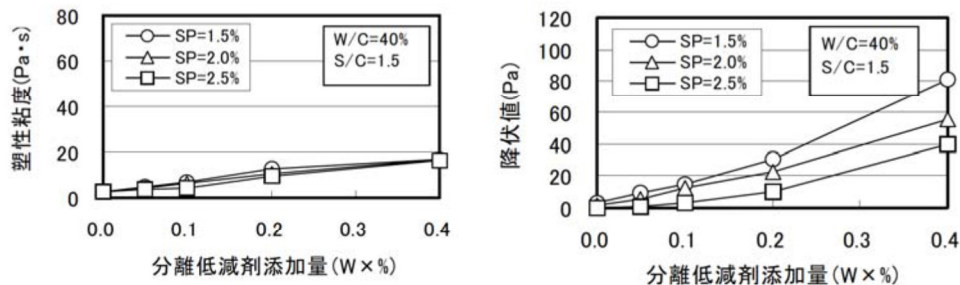


図-3.1 高性能 AE 減水剤と分離低減剤がモルタルの流動性に及ぼす影響¹⁾

3.2 実験概要

3.2.1 使用材料

(1) セメント

本実験では、セメントに普通ポルトランドセメント(JIS R 5210)を用いた。普通ポルトランドセメントの物理試験結果を表-3.1に示す。

表-3.1 普通ポルトランドセメントの物理試験結果

密度(g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性 (バット法)	圧縮強さ(N/mm ²)		
		水量(%)	始発(h-m)	終結(h-m)		3日	7日	28日
3.16	3300	26.1	2-15	3-15	良	31.6	48.4	66.8

(2) 細骨材

細骨材には石灰石砕砂を用いた。表-3.2に細骨材の物理試験結果を示す。また、骨材の粒径を考慮せず、間隙充填モルタルの流動性に着目して検討するため、1.2mm ふるいを通過した細骨材（以下、小粒径細骨材）のみを用いた。細骨材の粒度分布を図-3.2に示す。なお、骨材は一般に用いられているプレミックスタイプの間隙充填モルタルを模擬するため、絶乾状態で用いた。

表-3.2 小粒径細骨材の物理試験結果

名称	種類	粒径	密度(g/cm ³)		吸水率(%)
			表乾	絶乾	
小粒径細骨材	石灰石砕砂	1.2mm未満	2.58	2.54	1.50

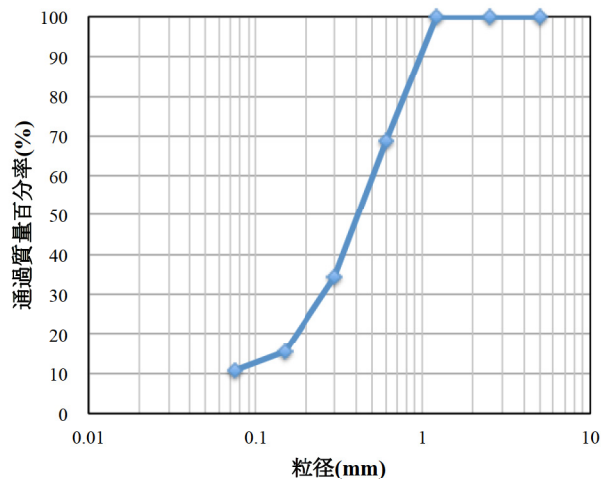


図-3.2 細骨材の粒度分布

(3) 混和剤

試料のレオロジー定数を調節するため、混和剤として高性能 AE 減水剤と増粘剤を添加した。また、練り混ぜ時に巻き込まれる空気泡を取り除くため、消泡剤を単位セメント量の 0.05% 添加した。

高性能 AE 減水剤は、ポリカルボン酸エーテル系高性能 AE 減水剤である BASF ジャパン社製のマスターグレンウム SP8SV（旧名：レオビルド SP8SV）を用いた。

増粘剤は、水溶液粘度が 190～350mPa・s（20℃、2.0%）であるメチルセルロースエーテル系増粘剤である、信越化学工業株式会社製の METOLOSE FL-30000 を用いた。

消泡剤は、消泡剤は、ポリアルキレングリコール誘導体を主成分とする BASF ジャパン社製マスターエア 404（旧名：マイクロエア 404）を使用した。

3.2.2 配合

本実験における試料の配合を表-3.3 に示す。水セメント比を 0.4、細骨材セメント比を 0.8 として一定とした。

増粘剤の添加量に応じて高性能 AE 減水剤の添加量を調節し、各配合のフローが 250mm（誤差±5%）となるようにした。なお、高性能 AE 減水剤は 4 倍希釈、消泡剤は 100 倍希釈にしたものを用いている。増粘剤および高性能 AE 減水剤の添加量は、3.3.1 全試験結果に記載する。

表-3.3 配合

W/C	S/C	単位量(kg/m ³)				高性能 AE減水剤 (C× %)	増粘剤 (W× %)	消泡剤 (C× %)
		W	C	S				
				< 1.2mm	≥ 1.2mm			
0.4	0.8	388	969	621	0	※	※	0.05

※添加量の詳細は 3.3 流動性試験結果に合わせて記載する。

3.2.3 試験項目

本実験において行った試験を表-3.4 に示す。各試験は記載の規準を基にしている。試験方法の詳細は 3.2.5 試験方法に記載する。

表-3.4 試験項目

試験項目	評価指標	試験方法
J14漏斗流下試験	漏斗流下時間(s)	JSCE-F541 準拠
JP漏斗流下試験		
簡易テーブルフロー試験 (ガラス板)	フロー(mm)	建築改修工事 監理指針 参考
	200mmおよび250mm フロー到達時間(s)	JSCE-F516 参考
簡易テーブルフロー試験 (アクリル板)	フロー(mm)	建築改修工事 監理指針 参考
粘度測定試験	塑性粘度(mPa・s)	JIS Z 8803 準拠
	降伏値(Pa)	
間隙充填性試験	間隙充填率(%)	別途記載

3.2.4 練混ぜ方法

図-3.3 に示すように、予めセメントと絶乾状態の細骨材を混合したものを前日に用意し、他の材料とともに室温 20℃の部屋にて一晩静置した。

室温は 20℃、1 バッチあたりの練り量は 10L とし、増粘剤は練混ぜ直前に混合した。図-3.4 に示すハンドミキサー（1100rpm）で水を攪拌しながら、上述の混合材料を 1 分程度かけて塊にならないように注意して投入し、全量投入後、3 分間練り混ぜた。練混ぜは全配合において筆者が行い、各配合で練混ぜ方に大きな差が生じないように注意して行った。



図-3.3 予め混合された材料



図-3.4 ハンドミキサー

3.2.5 試験方法

(1) J 漏斗流下試験

J14 漏斗流下試験は JSCE-F 541 に、JP 漏斗流下試験は JSCE-F 531 に、それぞれ準拠して行なった²⁾。J14 漏斗と JP 漏斗を図-3.5 に示す。

試験手順は、まず漏斗を鉛直に支持し、水を通して濡らす。試料を漏斗内に注ぎ、流出口から適量の試料を流出させたのち、指で流出口を押さえ、試料を上面まで注いだ後、上面をならす。

指を離し試料を流出させ、試料がはじめて途切れるまでの流下時間を測定した。なお、閉塞等により漏斗内の残留分が多い場合、その試料は不適とした。

実験では引き続いて2回目を行い、その平均値をJ漏斗流下時間とした。また、1回目と2回目の流下時間の差が大きい場合は引き続き3回目を行い、外れ値を除いた平均値を流下時間とした。

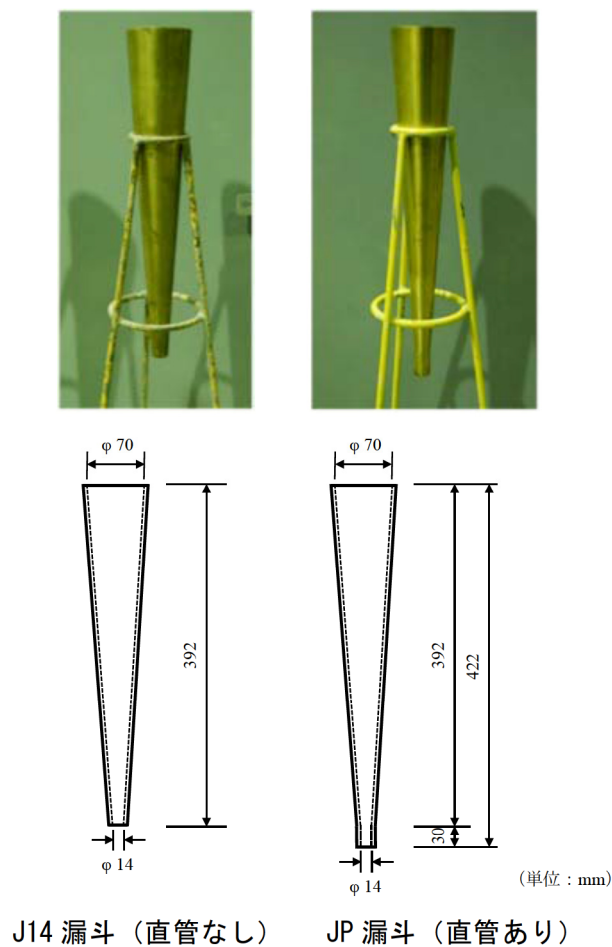


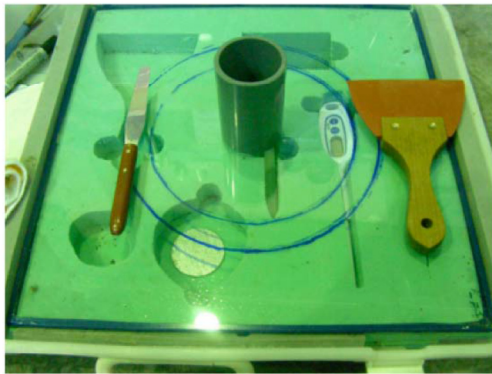
図-3.5 J14 漏斗と JP 漏斗

(2) 簡易テーブルフロー試験

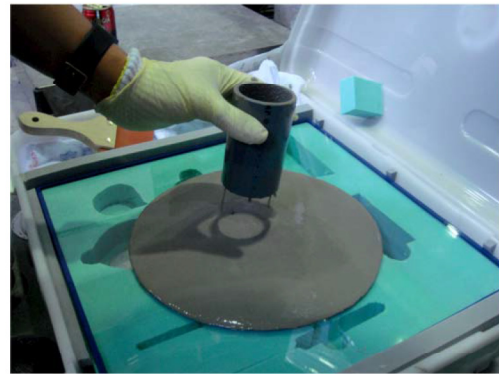
簡易テーブルフロー試験（以下、フロー試験）は、建築改修工事監理指針²⁾および JSCE-516「高流動コンクリートの 500mm フロー到達時間試験方法（案）」を参考にして行った。図-3.6 に試験器具および試験の様子を示す。

試験の手順は以下のとおりである。はじめに、ガラス板を水平に支持し、乾いた布で表面を拭く。次に、ガラス板上に内径 50mm、高さ 100mm の塩化ビニル製の円筒容器を置き、試料を充填する。円筒容器を引き上げ、フローが 200mm および 250mm に到達する時間をフロー到達時間とした。3 分後、2 方向（最長部およびそれに直交する方向）の直径を測定し、その平均値をフローとした。

また、現場での利便性を考慮し、ガラス板の他にアクリル板でも同様に試験を行い、フローを測定した。



(a) フロー試験器具



(b) 間隙充填モルタルのフローの様子

図-3.6 フロー試験の様子

(3) 粘度測定試験

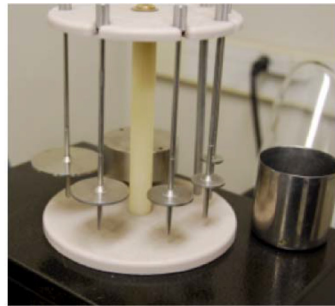
粘度測定試験に用いた B 型 (円筒ロータ式) 回転粘度計を図-3.7 に、試験の様子を図-3.8 に示す。また、レオロジー定数の測定例を図-3.9 に示す。

塑性粘度は、H4 ロータを使用し、回転数 50rpm、測定時間を 60 秒とし、15 秒ごと測定し、その平均値とした (0s、15s、30s、45s、60s の 5 点)。

降伏値は、主に H4 ロータを使用し、回転数を 20rpm、50rpm、100rpm の 3 水準、測定時間を 60 秒とし、15 秒ごとに測定した。回転数ごとに得られた平均ずり応力(Pa)と回転数(rpm)の関係をプロットし、近似式の傾きと切片から降伏値を算出した。なお、試料の粘性によって、測定条件を変更する必要があるため、使用ロータを H3 ロータや H5 ロータに変更、もしくは、回転数を 10rpm、20rpm、50rpm などに変更して測定した。



(a) 本体



(b) 使用ロータ

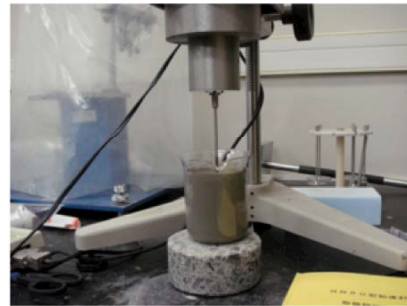


図-3.8 粘度測定試験の様子

図-3.7 B 型回転粘度計

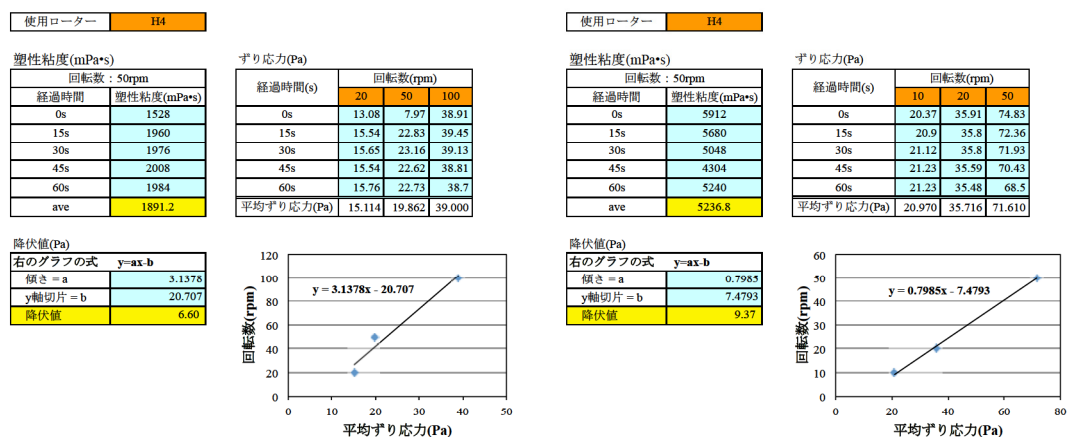


図-3.9 レオロジー定数の測定例

(4) 間隙充填性試験

本研究では、既往の研究³⁾を参考に、間隙充填性の評価を図-3.10に示す二重円筒式間隙充填性試験装置にて行った。装置は2本のアクリルパイプ（内パイプおよび外パイプ）から構成されており、間隙幅は外パイプの径のみを変化させて調節した。内パイプと外パイプの内径および外径を表-3.5に示す。また、試験の様子を図-3.11に示す。

鋼板巻立て工法の実施工においては、最狭部を間隙充填モルタルが充填できる限界と考えられる5mm以下とするため、間隙幅を20mm以上確保することが推奨されている⁴⁾。また、5mm程度なら充填可能である、といった報告⁵⁾もされている。このことから、本研究室では2、5および8mmの間隙幅で検討を行った結果、8mmは問題なく充填し、2および5mmでは粒径や流動性の相違によって充填率に差が生じた⁶⁾。このことから、本検討では5mm以下の間隙幅に着目し、2、3、および5mmの間隙幅を対象とした。

試験手順を以下に示す。

- 1) 高さ500mm、内径30mmの内パイプに試料（約320ml）を上縁から50mm下がった位置（外パイプの高さ）まで投入する。
- 2) 試料投入後、内パイプを間隙幅（2、3、5mm）に相当する分だけ上方に引き上げ、内パイプ内の試料の自重により、内パイプと外パイプの間隙に充填させる。
- 3) 試料が内パイプから、内パイプと外パイプの間隙へ流動して上昇した高さを測定し、充填高さとした。内パイプ中の試料と外パイプ中の試料の高さが等しくなった時の高さを理論充填高さとし、充填高さを理論充填高さで除した値を間隙充填率と定義した。理論充填高さは以下に示す式を用いて算出した。また、試料投入の際、試料を所定の高さを超えて投入してしまった場合、所定の高さから超えた分を補正值として記録し、間隙充填率に補正をかけた。

$$h_t = \frac{d_1^2(h_0 + h') - d_3^2 \times B}{d_3^2 - d_2^2 + d_1^2} + B$$

h_t :理論充填高さ(mm)、 h_0 :試料投入の所定の高さ(mm)、 h' :補正值(mm)

d_1 :内パイプ内径(mm)、 d_2 :内パイプ外径(mm)、 d_3 :外パイプ内径(mm)、 B :間隙幅(mm)

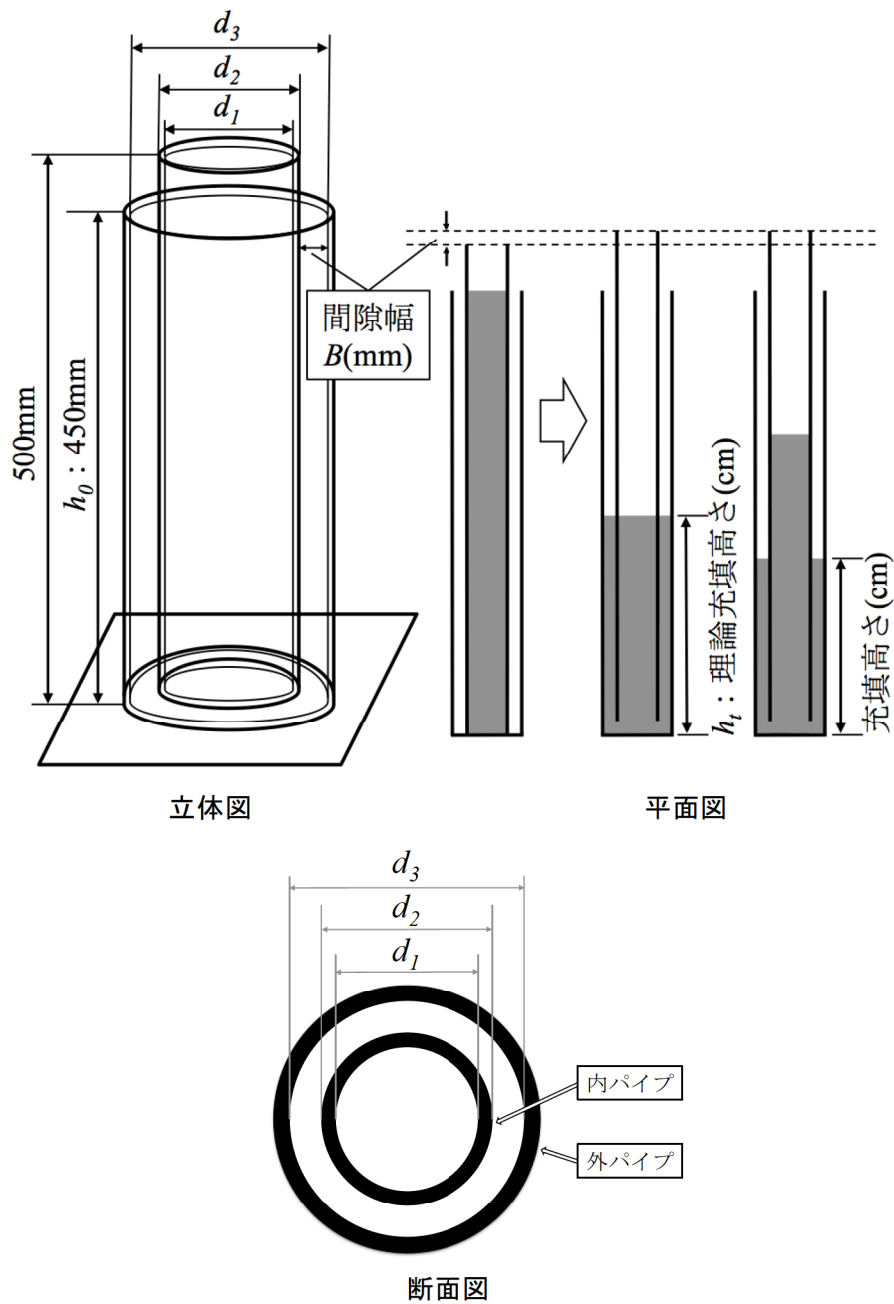


図-3.10 二重円筒式モルタル間隙充填性試験装置概略図

表-3.5 アクリルパイプの寸法

B : 間隙幅(mm)	内パイプ寸法(mm)			外パイプ寸法(mm)		
	d_1 : 内径	d_2 : 外径	高さ	d_3 : 内径	外径	h_0 : 高さ
2	30	40	500	44	54	450
3				46	56	
5				50	60	



図-3.11 間隙充填試験の様子

3.3 流動性試験結果

3.3.1 全試験結果

全試験結果を表-3.6に示す。3.1はじめに示したとおり、フローを250mm程度（誤差±5%以内：237.5～262.5mm）に統一し、その上でそれぞれ塑性粘度の異なる試料を作製した。J14 漏斗流下時間に関しては、2.1.5 間隙充填モルタルの品質管理基準で示した規格値と比較し、大きいものから小さいものを作製することができた。なお、フローが237.5～262.5mmの範囲に入らなかった配合に関しては各試験を行っていない。

表-3.6 試験結果

No.	増粘剤 (W×%)	SP (C×%)	判定	フロー試験				J漏斗流下試験		間隙充填性試験			粘度測定試験	
				±2%→◎ ±5%→○ 他→×										
				フロー(mm)		フロー到達時間(s)		漏斗流下時間(s)		間隙充填率(%)			塑性粘度 (mPa・s)	降伏値 (Pa)
				ガラス板	アクリル板	200mm	250mm	J14	JP	2mm	3mm	5mm		
1	0.10	0.7	○	256	247	0.31	5.72	4.09	5.13	93	95	100	995.2	6.49
2	0.20	0.8	◎	247	-	2.14	-	5.51	7.87	92	92	99	1756.8	8.10
3	0.30	1.2	○	257	263	2.71	37.78	7.59	11.70	88	95	99	2169.6	8.47
4	0.35	1.5	○	257	261	4.00	41.60	9.27	14.66	88	91	99	2798.4	9.08
5	0.40	1.7	◎	255	252	3.53	92.90	12.91	19.85	90	91	96	3568.0	5.50
6	0.45	2.2	○	257	261	6.18	119.82	15.35	23.62	89	92	96	4350.4	10.22
7	0.48	2.3	◎	254	255	9.12	146.83	18.14	29.23	88	90	94	5065.6	17.78
8	0.50	2.5	◎	252	251	9.16	172.34	18.79	30.62	85	88	94	5262.4	16.03
9	0.55	2.8	◎	247	250	17.12	-	25.84	44.30	81	87	92	6963.2	21.51
10	0.57	3.3	○	244	245	14.90	-	25.90	43.51	73	73	94	6467.2	15.82
11	0.60	3.5	◎	245	252	17.90	-	28.29	42.85	69	75	91	6387.2	14.50
12	0.65	4.5	◎	249	248	16.93	-	27.16	46.80	64	81	90	6174.4	9.92
13	0.70	5.5	○	260	248	13.62	138.00	19.29	30.69	73	81	90	4726.4	11.57

3.3.2 混和剤の添加量

増粘剤の添加量と塑性粘度の関係を図-3.12 に示す。No.10～13（図中、白抜きで示す4点）の配合は、分離低減剤の添加量の増加に関わらず、塑性粘度が低下してしまっていることがわかる。これには、二つの理由が考えられる。まず、高性能 AE 減水剤の添加量が過大な場合、塑性粘度も低下すると考えられる。次に、同一のフローを得るために高性能 AE 減水剤の添加量が増加するため、増粘剤が作用するための水が不足したと考えられる。前者は高性能 AE 減水剤の添加量の限界値と考えられ、後者は増粘剤の添加量の限界値と考えられる。高性能 AE 減水剤の添加量の増大による、モルタルの引張強度に相当する強度の低下が起こることも報告されている⁴⁾。

いずれにせよ、No.9 までの配合とは同一の塑性粘度であっても異なる性状を持つことから、両者の比較はすべきではないと判断し、No.10～13 の配合に関しては、本検討からは除外している。

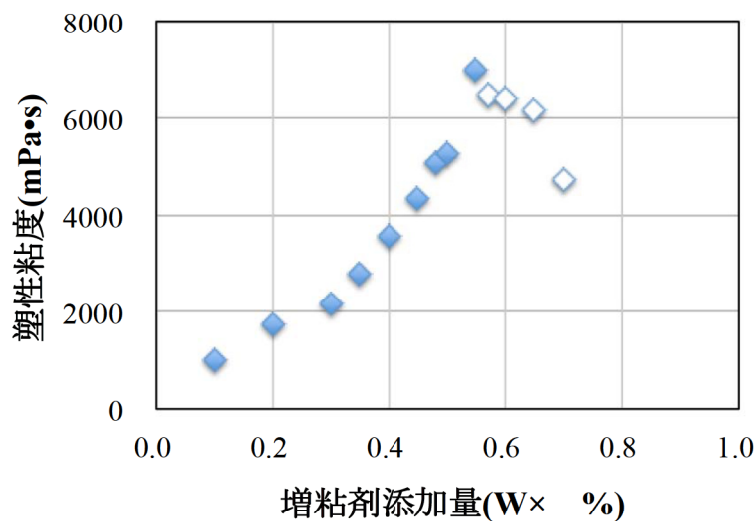


図-3.12 増粘剤添加量と塑性粘度の関係

3.3.3 降伏値と塑性粘度

本検討では B 型回転粘度計を用いてレオロジー定数を算出している。ここで、試料のレオロジー定数の変化を検討するため、試料の降伏値と塑性粘度の関係を 2012 年の検討と合わせて図-3.13 に示す。2.2.1 レオロジーに示したとおり、流動曲線における傾きの逆数が塑性粘度、切片が降伏値に対応するため、基本的にこれらは独立した値を持つはずである。しかし、多くの場合どちらかが一方的に変化することがなく、両者が同様の変化をすることが多い。そのため、2012 年の検討では、塑性粘度と降伏値のどちらが充填性に影響を与えているか不明確である。

本検討では、高性能 AE 減水剤の効果により、フローを 250mm 程度に統一しているため、降伏値の影響は考えずに、塑性粘度に着目して検討することが可能と考えられる。しかし、塑性粘度の変化に応じて、降伏値が少なからず変化してしまうことは、次項以降の検討に関しても注意しなければならない。

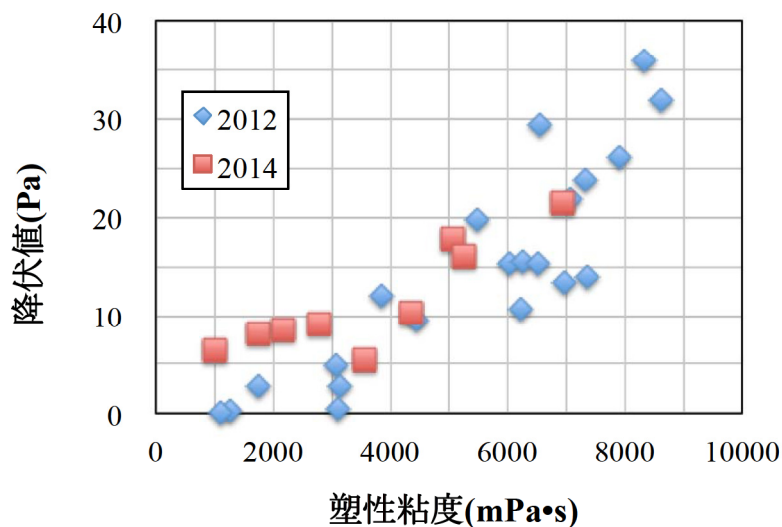


図-3.13 降伏値と塑性粘度の関係

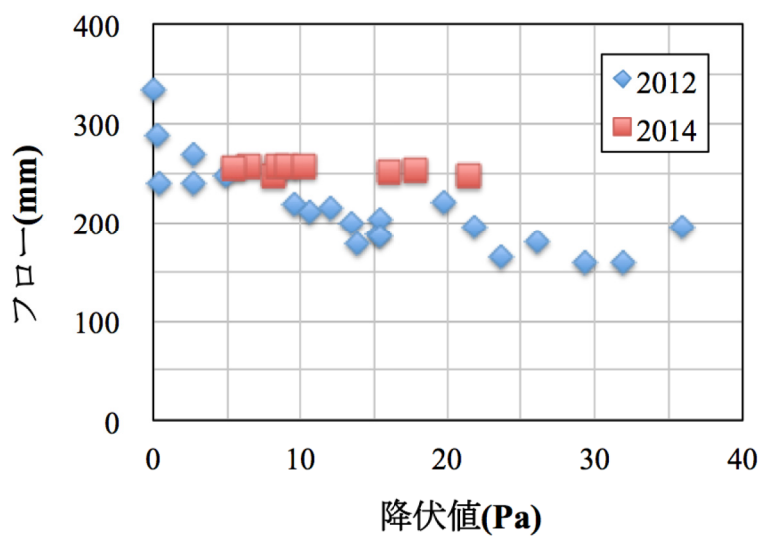
3.3.4 フローとレオロジー定数

フローとレオロジー定数の関係を、2012 年の検討と合わせ図-3.14 に示す。2.2.3 フロー試験に示したように、一般的にはフローは降伏値の影響を受けるとされ、2012 年の検討でもフローと降伏値の間には相関が認められる。渡辺ら⁶⁾は、この関係から、フローの値を用いて降伏値を算出する式⁵⁾を用いており、その理論値と実測値は概ね一致している。なお、この 2012 年の検討は、高性能 AE 減水剤と分離低減剤の添加量を一定の水準で変化させ、混和剤の添加量の変化による流動性の変化を検討したものである。

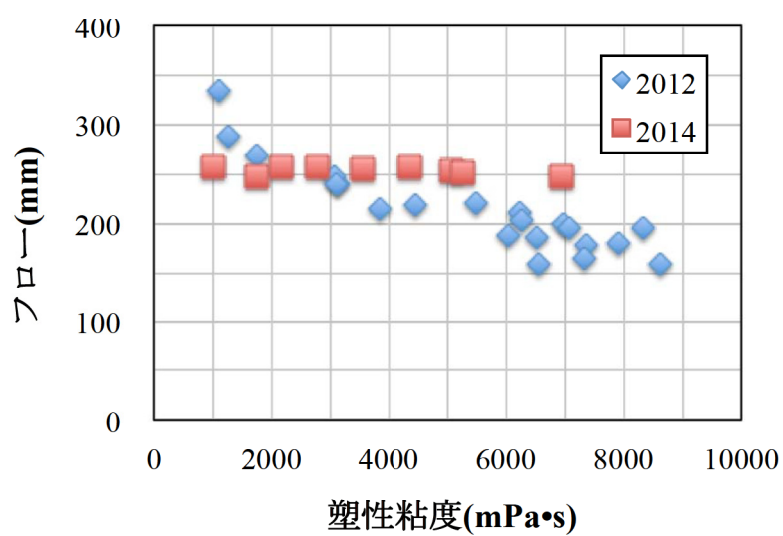
しかし、今年度の検討の結果を見ると、フローと降伏値には相関がみられるとは言えない。今年度は高性能 AE 減水剤と分離低減剤の添加量を調整し、フローを 237.5～262.5mm という限定的な範囲に入る試料を対象としたので、本来は降伏値もほぼ一定の値をとるはずである。しかしながら、降伏値には 5～15Pa の差があり、一定の値であると言い難い。フロー237.5～262.5mm の範囲に対応した降伏値の範囲が 5～15Pa である可能性も考えられるが、いずれにせよ、回転粘度計によって求めた降伏値とフローの値には相関が必ずしも認められないことが明らかとなった。つまり、本検討のように、高性能 AE 減水剤でフローを意図的に大きくするとき、降伏値の値は意味を持たず、充填性を評価することはできない。

これは、回転粘度計によって算出される降伏値がモルタル中の液相のレオロジー定数であることによると考えられる。高性能 AE 減水剤のセメント粒子を分散させる作用により、見かけの降伏値が低下し、フローは 250mm 程度まで広がるが、モルタル中の液相の降伏値は増粘剤の添加により増大し、高性能 AE 減水剤の影響を受けないと考えられる。そのため、フローが 250mm 程度であっても、降伏値の値にばらつきが生じると考えられる。

次に、フローと塑性粘度の関係についてだが、一般的に塑性粘度は、モルタルの流動速度に影響している。モルタルの流動速度とレオロジー定数に関しては、3.3.3 フロー到達時間とレオロジー定数で述べる。2.2.3 フロー試験で示したように、ある程度、流動速度が大きいモルタルであれば、塑性粘度もまた、フローに影響を与える可能性があると考えられるが、本検討においては両者の間に相関はみられない。なお、2012 年の検討においては、相関が認められるが、これは 3.3.1 降伏値と塑性粘度に示した通り、塑性粘度の変化に応じて、降伏値が変化してしまっていることによると考えられる。



(a) フローと降伏値



(b) フローと塑性粘度

図-3.14 フローとレオロジー定数の関係

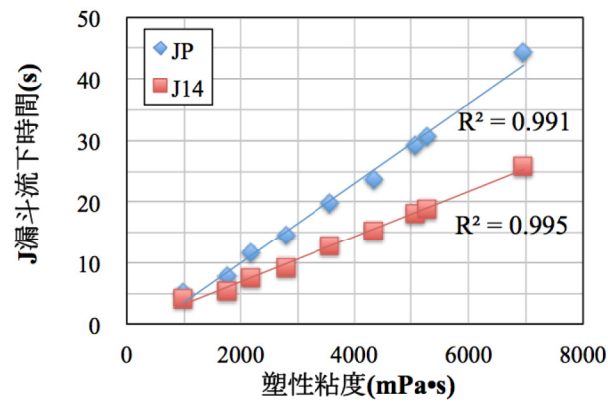
3.3.5 J 漏斗流下時間とレオロジー定数

J 漏斗流下時間とレオロジー定数の関係を図-3.15(a)に示す。2.2.2 J 漏斗流下試験に示したように、J 漏斗流下時間と塑性粘度の間には相関が認められることが知られている。今年度の検討においても、高い相関が認められ、J 漏斗流下時間が塑性粘度の簡易評価指標となることが改めて確認できる。

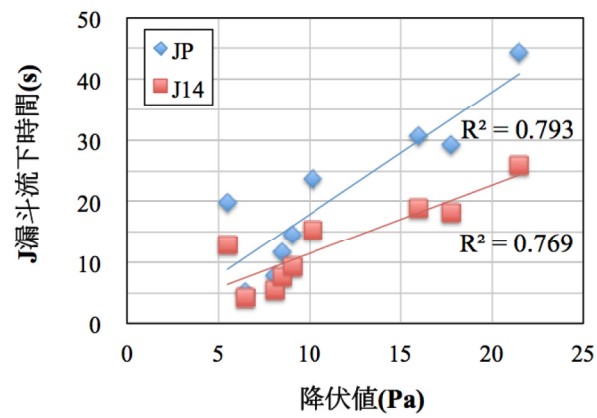
また、J 漏斗流下時間と降伏値の関係を図-3.15(b)に示す。J 漏斗流下時間と降伏値の間には一般的に相関はみられないとされている。しかし、本研究では、間隙充填モルタルをビンガム流体と仮定しているため、漏斗内部では栓流が生じる。その栓流の範囲を示す栓流半径は、降伏値を一つの要因としているため、必ずしも J 漏斗流下時間と降伏値は無関係であるとは言えない。しかし、本検討において、両者の間に少なからず相関が認められるのは、3.3.1 降伏値と塑性粘度に示した通り、塑性粘度の変化に応じて、降伏値が変化してしまっていることによると考えられる。

以上のように降伏値が J 漏斗流下時間に与える影響はゼロではないが、その影響は小さいと考えられるため、J 漏斗流下時間は塑性粘度を評価する指標であると判断できる。

また、J14 漏斗流下時間と JP 漏斗流下時間の関係を図-3.16 に示す。本検討では小粒径細骨材のみを用いているため、骨材粒径の影響を受けず、両者の間には高い相関が認められ、どちらの漏斗を用いても塑性粘度を評価することは可能である。JP 漏斗は流出口に直管部を有しているため、J14 漏斗に比べ、流下時間が長くなり、塑性粘度が高くなるにつれ、J14 漏斗流下時間と JP 漏斗流下時間の差は大きくなる。そのため、J14 漏斗よりも JP 漏斗の方が、流動性の差を明確に示すことが可能である。なお、塑性粘度が高くなるにつれ、試料が流出終了するタイミングの判断が難しく、測定誤差が生じやすいため、注意が必要である。



(a) J漏斗流下時間と塑性粘度



(b) J漏斗流下時間と降伏値

図-3.15 J漏斗流下時間とレオロジー定数の関係

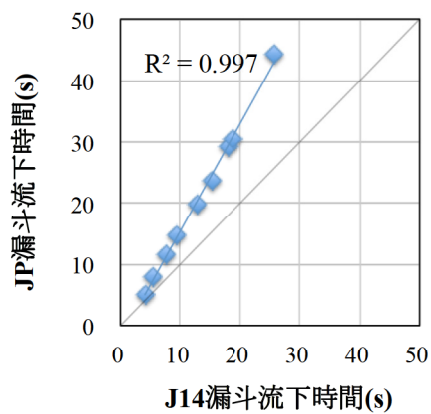


図-3.16 J14漏斗流下時間とJP漏斗流下時間の関係

3.3.6 フロー到達時間とレオロジー定数

フロー到達時間は、高流動コンクリートにおけるスランプロー試験でも、500mm フロー到達時間として並行して計測されており、その値は塑性粘度と高い相関関係にあることが知られている。

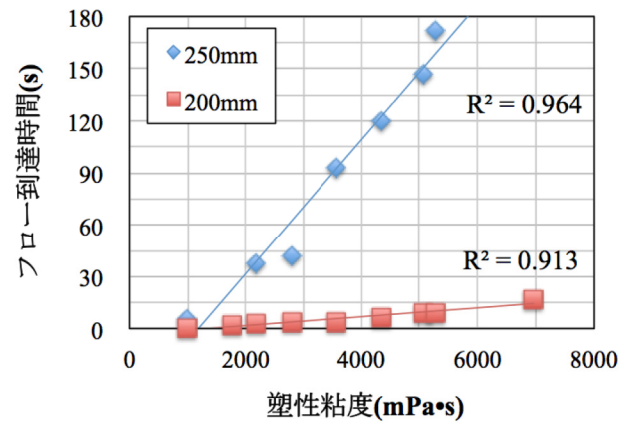
フロー到達時間と塑性粘度の関係を図-3.17(a)に示す。200mm フロー到達時間および250mm フロー到達時間のどちらも、塑性粘度との間に高い相関が認められる。このことから、J 漏斗流下時間と並行して、フロー到達時間を計測することで、現場において間隙充填モルタルの流動性を評価する際、塑性粘度をより精度よく評価することが可能である。また、200mm フロー到達時間と250mm フロー到達時間の関係を図-3.18に示す。本検討では小粒径細骨材のみを用いているため、骨材粒径の影響を受けず、両者の間には高い相関が認められ、どちらの値を用いても塑性粘度を評価できることがわかる。

しかしながら、フロー到達時間の測定には幾つかの課題が存在する。まず、本検討では、フローを250mm 程度に統一しているため、塑性粘度が低い場合200mm に到達する時間は非常に早く、1秒未満の値であることが多い。そのため、測定者による誤差がJ 漏斗流下時間よりも大きくなってしまう可能性がある。加えて、本検討ではフローが250mm に到達しない配合も存在するため、250mm フロー到達時間が計測できていない配合が存在する。また、塑性粘度が5000mPa・s 程度と高い場合、フロー試験にかかる時間である3分後まで、フローは拡大するため、250mm に到達したかどうか判断するのは測定者に委ねられる。

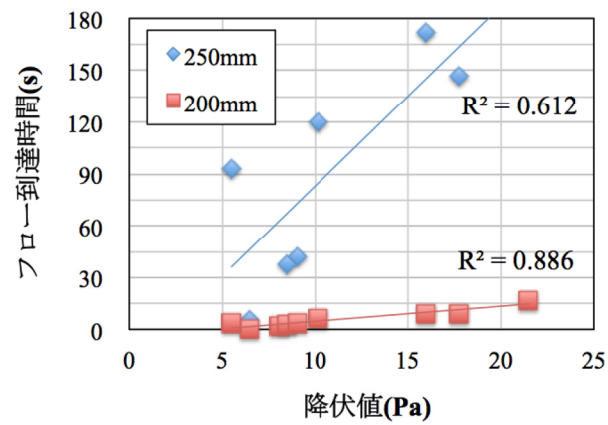
本検討のようにフローが250mm 程度である場合、200mm フロー到達時間や、250mm フロー到達時間は適切に測定できないことがある。しかし、塑性粘度との相関は明確であり、現場における試験方法として優れているため、今後の測定方法の改良を検討するべきである。

間隙充填モルタルの使用方法は様々であり、それらの要求性能も様々であるが、どの使用法においても概ねフローが250mm 以上でないと要求性能に満たないと考えられる。要求されたフローの値やJ 漏斗流下時間に応じて、到達時間を計測する長さを適宜判断することが重要である。その際は、200mm、250mm、300mm を目安に計測し、比較することが望ましい。

フロー到達時間と降伏値の関係を図-3.17(b)に示す。両者がある程度相関しているように見られるのは、3.3.1 降伏値と塑性粘度に示した通り、塑性粘度の変化に応じて、降伏値が変化していることによると考えられる。



(a) フロー到達時間と塑性粘度



(b) フロー到達時間と降伏値

図-3.17 フロー到達時間とレオロジー定数の関係

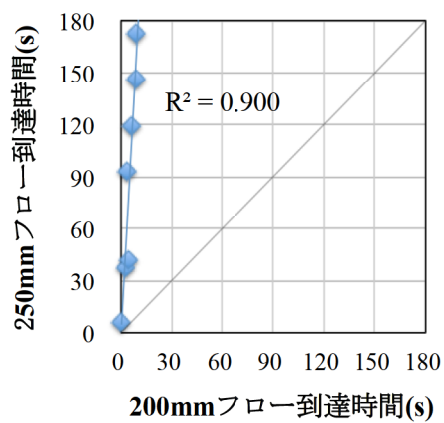


図-3.18 200mm フロー到達時間と 250mm フロー到達時間の関係

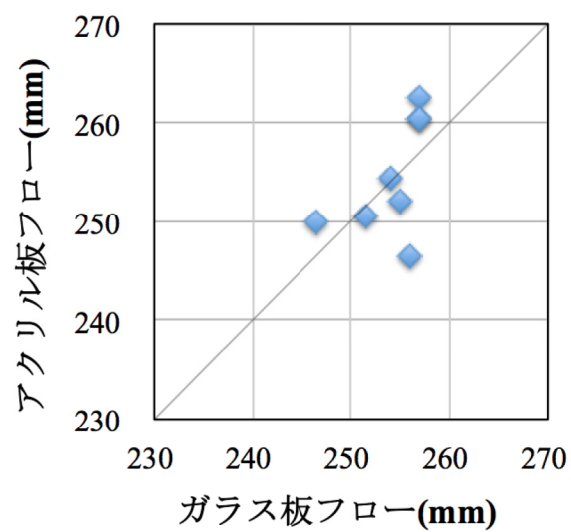
3.3.7 ガラス板フローとアクリル板フロー

フロー試験では、一般的にフローテーブルとしてガラス板が用いられるが、現場で扱うには重く、また割れやすい材質である。そこで、本研究室では、実際の作業現場での利便性を考慮し、ガラス板の代わりにアクリル板を用いたフロー試験も、並行して行っている。

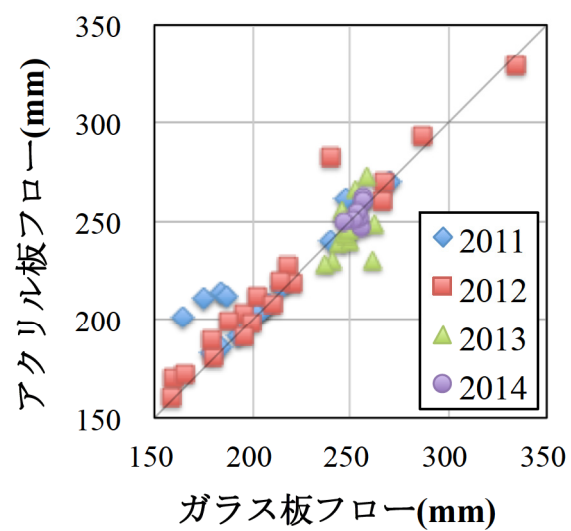
ガラス板フローとアクリル板フローの関係を図-3.19(a)に示す。両者の間には相関が認められ、最大でも 15mm 以下の誤差に収まっていることがわかる。

しかし、アクリル板は繰り返しの使用による表面の摩耗が生じて、表面状態が変化する可能性が考えられる。アクリル板を用いた試験は、本研究で 4 年目であり、過去の同試験の結果を合わせて図-3.19(b)に示す。同一のアクリル板を繰り返し使用しているが、大きく値が異なることは少なく、今年度の結果と合わせても、ガラス板フローとアクリル板フローの差は小さいと判断できる。

以上より、アクリル板をガラス板の代替として用いることは十分可能であると考えられる。今後の研究においてもアクリル板フロー試験を実施し、データを蓄積していくことで、アクリル板を用いたフロー試験を提案していくことが望ましい。



(a) 今年度の検討



(b) まとめ

図-3.19 ガラス板フローとアクリル板フローの関係

3.4 流動性が充填性に及ぼす影響

3.4.1 間隙充填率とレオロジー定数

間隙充填率とレオロジー定数の関係を図-3.20 に示す。本検討では、小粒径細骨材のみを用いた配合であるため、粒径の影響を受けず、モルタルとしての流動性が充填性に与える影響に着目して比較可能となる。また、フローを統一していることから、塑性粘度が充填性に与える影響と考えることができる。

また、本試験は JSCE-F511「高流動コンクリートの充填性試験方法（案）」から着想を得ている。この試験では、最大充填高さは 335mm となるが、自己充填性を満足するための充填高さを 300mm 以上と規定している。このときの間隙充填率を充填高さと理論充填高さから算出すると、89.6%となる。そこで、本研究の二重円筒式間隙充填性試験においても、間隙充填率 90%を充填性の目安とした。

塑性粘度が低いとき、間隙幅 5mm は 100%充填するが、3mm と 2mm は 100%充填することはない。しかし、これらの場合でも、間隙充填率 90%を超えるため、充填したとして評価した。また、塑性粘度が増加するに従い、間隙幅によらず、充填率が低下していることがわかる。これは、粘性が高くなることで、壁面との粘性抵抗が大きくなり、充填が終了したためと考えられる。このことから、間隙充填率 90%未満を未充填と判断すると、各間隙幅に対する塑性粘度の上限を定めることができる。

ここで、本実験の範囲内で最小二乗法により算出した間隙充填率と塑性粘度の関係を以下に示す。

間隙充填率と塑性粘度の関係

$$Y_5 = -0.00135X + 101.46 \quad Y_3 = -0.00140X + 96.319 \quad Y_2 = -0.00165X + 94.218$$

ここで、 Y_5 :間隙幅 5mm における間隙充填率(%)

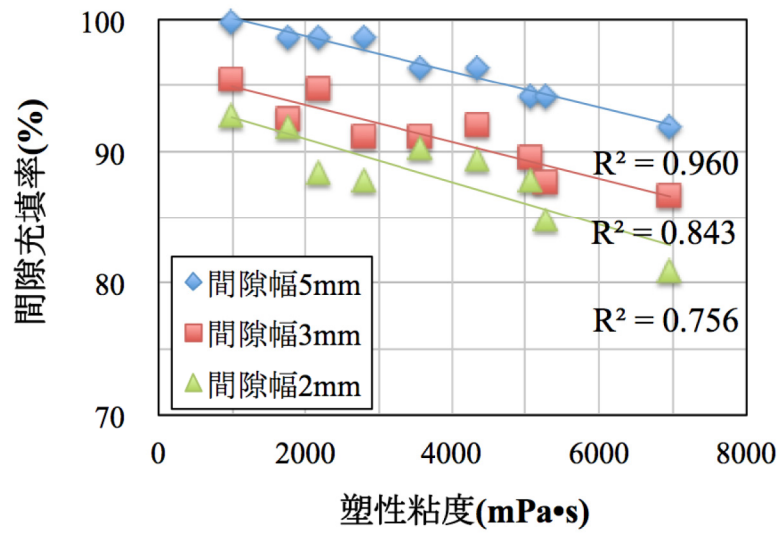
Y_3 :間隙幅 3mm における間隙充填率(%)

Y_2 :間隙幅 2mm における間隙充填率(%)

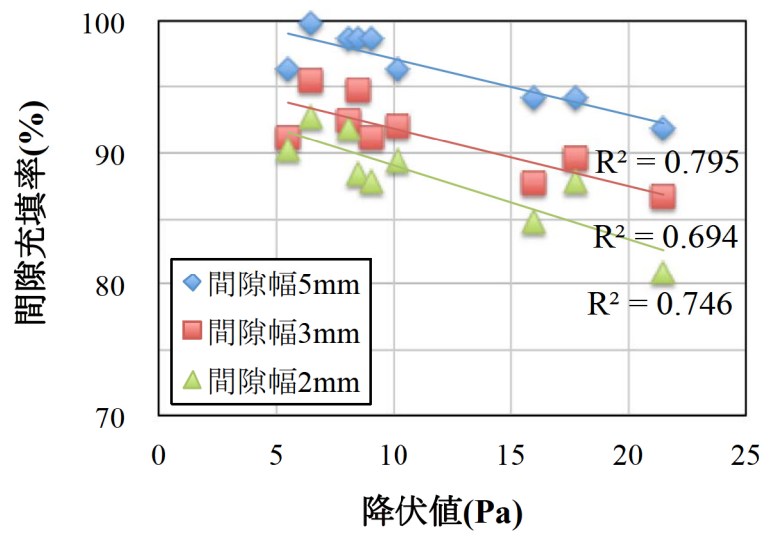
X :塑性粘度(mPa・s)

上記の関係を用いて上限値を求めると、本研究の範囲内では、間隙幅 5mm に対しては塑性粘度が 8500mPa・s 程度、3mm に対しては 4500mPa・s 程度、2mm に対しては 2500mPa・s 程度となる。

また、間隙充填率と降伏値の間にも相関が見られる。3.3.2 フローとレオロジー定数の関係および 3.3.1 降伏値と塑性粘度の関係に示した通り、試料の塑性粘度の変化に対応して降伏値も変化しているからであると考えられる。



(a) 間隙充填率と塑性粘度



(b) 間隙充填率と降伏値

図-3.20 間隙充填率とレオロジー定数

3.4.2 間隙充填率と J 漏斗流下時間およびフロー到達時間

間隙充填率と J 漏斗流下時間の関係を図 3.21 に、200mm フロー到達時間との関係を図 3.22 に示す。3.3.3 J 漏斗流下時間とレオロジー一定数の関係および 3.3.4 フロー到達時間とレオロジー一定数の関係に示した通り、J 漏斗流下時間およびフロー到達時間と塑性粘度の間には高い相関が認められる。それぞれのグラフを見ても、3.4.1 間隙充填率とレオロジー一定数に示した間隙充填率と塑性粘度の関係と同様の変化をしていることがわかる。このことから、塑性粘度と同様に、間隙充填率 90%未満を未充填と判断すると、本研究の範囲内で各間隙幅に対する J 漏斗流下時間およびフロー到達時間の上限を定めることができる。なお、250mm フロー到達時間に関しては、塑性粘度が低い時と高い時で、その値の差が非常に大きくなることから、適切な上限値を定めることができないと考えられるため、検討から除外している。

ここで、本実験の範囲内で最小二乗法により算出した J 漏斗流下時間およびフロー到達時間と塑性粘度の関係を以下に示す。

各試験値と塑性粘度の関係

$$Z_1 = 0.00371X - 0.50905 \quad Z_2 = 0.00650X - 2.9969 \quad Z_3 = 0.00255X - 3.3149$$

ここで、 Z_1 :J14 漏斗流下時間(s)

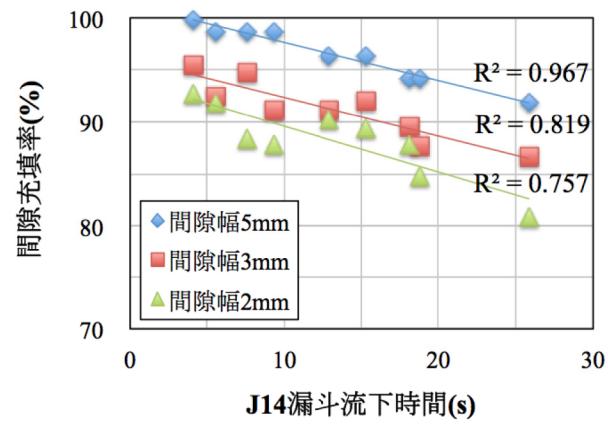
Z_2 :JP 漏斗流下時間(s)

Z_3 :200mm フロー到達時間(s)

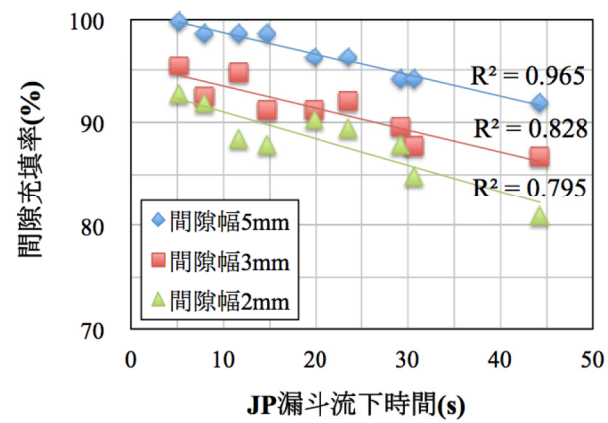
X:塑性粘度(mPa·s)

本研究の範囲内で、上記の関係を用いて求めた上限値を以下に示す。

- (1) 間隙幅 5mm に対して、塑性粘度の上限値が 8500mPa·s 程度であることから、それに対応する J14 漏斗流下時間は 30 秒程度、JP 漏斗流下時間は 52 秒程度、200mm フロー到達時間は 20 秒程度である。
- (2) 間隙幅 3mm に対して、塑性粘度の上限値が 4500mPa·s 程度であることから、それに対応する J14 漏斗流下時間は 15 秒程度、JP 漏斗流下時間は 25 秒程度、200mm フロー到達時間は 8 秒程度である。
- (3) 間隙幅 2mm に対して、塑性粘度の上限値が 2500mPa·s 程度であることから、それに対応する J14 漏斗流下時間は 9 秒程度、JP 漏斗流下時間は 13 秒程度、200mm フロー到達時間は 4 秒程度である。



(a) J14 漏斗流下時間



(b) JP 漏斗流下時間

図-3.21 間隙充填率と J 漏斗流下時間

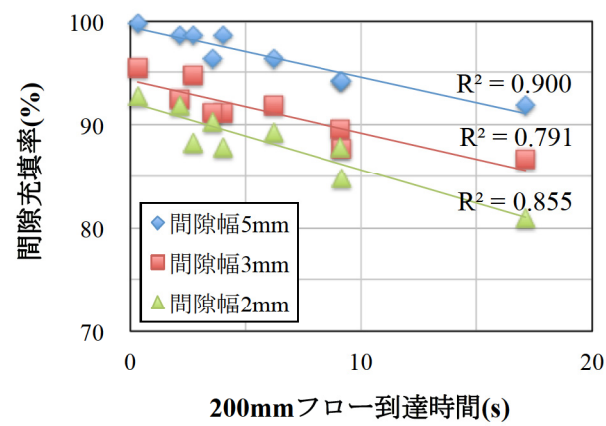


図-3.22 間隙充填率と 200mm フロー到達時間

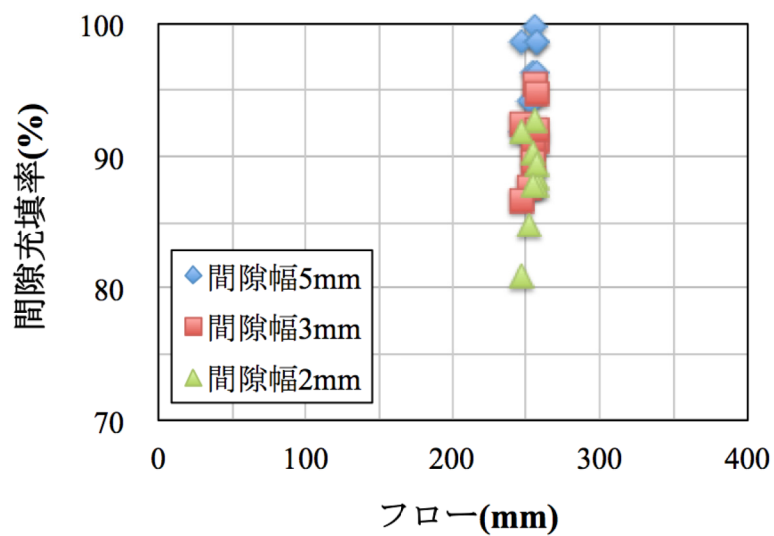
3.4.3 間隙充填率とフロー

既往の研究や、2.4.4 平成25年度の検討に示す通り、フローは間隙充填性を評価する指標と考えられてきた。そこで、本検討では上述の通りフローを 250mm 程度（誤差±5%以内：237.5～262.5mm）に統一している。

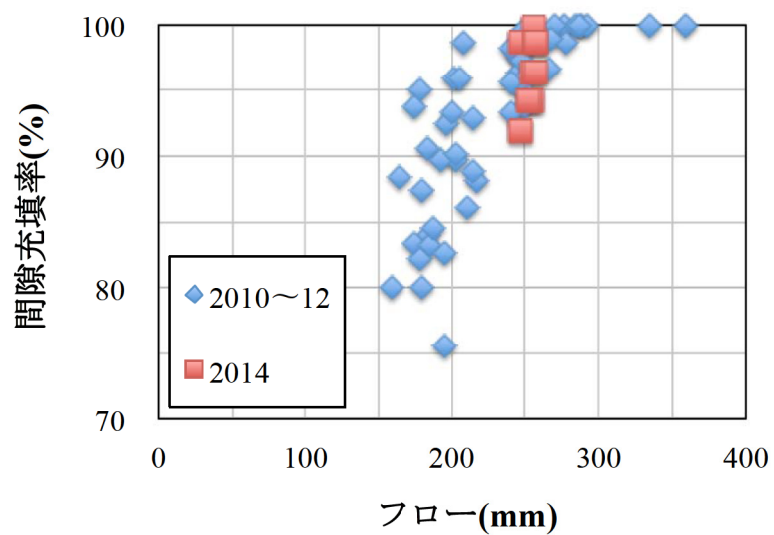
間隙充填率とフローの関係を図-3.23(a)に示す。間隙充填率とフローの間には相関はみられず、フローが間隙充填性を評価する指標であるとは一概には言えないことが明らかとなった。また、フローが 250mm 程度では、間隙充填率が 90%に満たない配合もあることから、フローの条件を満たすだけでは良好な充填性は得られないことが明らかとなった。

また、間隙充填率とフローの関係を、本研究室で行われてきた過去の研究の結果と合わせ図-3.23(b)に示す。フローが 250mm 付近を境に間隙充填率は 100%に近づき、多くの配合が 90%の条件を満たしていることがわかる。

以上より、フローはある間隙幅を充填する際に、最低限満たすべき条件として扱い、その上で、塑性粘度や骨材粒径などの影響を考慮することで、間隙充填モルタルの充填性に関してより精度の高い評価を行うことができると考えられる。



(a) 今年度の検討



(b) (昨年度までの検討結果との比較)

図-3.23 間隙幅 5mm における間隙充填率とフロー

3.4.4 間隙幅に応じた塑性粘度および各試験値の上限値

3.4.1 間隙充填率とレオロジー定数および 3.4.3 間隙充填率と J 漏斗流下時間およびフロー到達時間において、間隙幅に応じた塑性粘度、J14 漏斗流下時間、JP 漏斗流下時間、200mm フロー到達時間の上限値を定めた。それらをまとめて表-3.7 に示す。これらの結果はあくまでも、フローを 250mm 程度に統一した試料を用いた本検討の範囲内であることに注意しなければならない。しかし、現場では回転粘度計を用いた粘度測定試験のようなレオロジー定数を直接的に計測することはまず不可能であることから、簡易評価試験の結果と充填性の結びつきを明確にすることは非常に重要なことである。

表-3.7 間隙幅に応じた塑性粘度および各試験値の上限値

間隙幅	充填率(%)	フロー(mm)	塑性粘度 (mPa・s)	J14漏斗 流下時間(s)	JP漏斗 流下時間(s)	200mmフロー 到達時間(s)
5mm	90	250(±5%)	8488.9	30.98	52.18	18.33
3mm			4513.6	16.24	26.34	8.19
2mm			2587.7	9.09	13.82	3.28

3.5 まとめ

本章では、間隙充填モルタルのフローを 250mm に統一し、試料の流動性、特に塑性粘度の相違が充填性に与える影響について検討を行った。以下に本章で得られた知見を示す。

- (1) 間隙充填率とフローの間に相関はみられず、フローが間隙充填性を評価する指標であるとは一概には言えないことが明らかとなった。また、フローが 250mm 程度では、間隙充填率が 90%に満たない配合もあることから、フローの条件を満たすだけでは良好な充填性は得られないことが明らかとなった。フローはある間隙幅を充填する際に、最低限満たすべき条件として扱い、その上で、塑性粘度や骨材粒径などの影響を考慮することで、間隙充填モルタルの充填性に関してより精度の高い評価を行うことができると思われる。
- (2) 間隙幅によらず、塑性粘度が増加するに伴い充填率は低下する。これは、粘性が高くなることで、壁面との粘性抵抗が大きくなり、充填が終了したためと考えられる。間隙充填率 90%未満を未充填と判断すると、各間隙幅に対する塑性粘度の上限値を定めることができる。
- (3) J 漏斗流下時間およびフロー到達時間と塑性粘度の間には高い相関が認められたため、これらの試験は塑性粘度を簡易的に評価する試験として妥当であることが改めて明らかとなった。塑性粘度と同様に、間隙充填率 90%未満を未充填と判断すると、本研究の範囲内で各間隙幅に対する J 漏斗流下時間およびフロー到達時間の上限値を定めることができる。

参考文献

- 1) 宮本欣明、山本康弘：高流動モルタルの流動性の評価に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp.903-908、2002
- 2) 財団法人建築保全センター：建築改修工事監理指針平成19年度下巻（国土交通省大臣官房官庁営繕部監修）
- 3) 石山陽介、水島遼、宇治公隆、上野敦：間隙充填材の流動性および充填性の評価手法、コンクリート工学年次論文集、Vol32、No.1、pp.1331-1336、2010
- 4) 近藤直孝、半田実、福嶋一秋、柳沢直仁：特殊グラウト材の耐震補強工事・鋼板巻立て工法への適用、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.2、pp.119-124、1996
- 5) 斎藤恵二、地頭菌博、毛見虎雄、藤井和俊：鋼板巻立て補強工法に用いるグラウト材の充填材に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No.52、pp.885-889、1998
- 6) 石山陽介、宇治公隆、上野敦、大野健太郎：間隙充填モルタルの充填性に影響を及ぼす要因とその評価手法、コンクリート工学年次論文集、Vol33、No.1、pp.1367-1372、2011
- 7) 井上和政、和泉意登志、瀬古繁喜、安部靖弘：高流動コンクリート中のフレッシュモルタルの粘性と粗骨材への付着に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp.95-100、1994
- 8) 小林理恵、谷川恭雄、森博嗣、黒川善幸：フレッシュコンクリートのスランピング挙動に対するレオロジー的研究、日本建築学会構造系論文集、pp.1-10、1994
- 9) 渡辺健治、小野博宣、谷川恭雄：フレッシュモルタルのレオロジー性質に及ぼす際撹拌の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol22、No.2、pp.427-432、2000

第4章 骨材粒径の相違が充填性に及ぼす影響

4.1 はじめに

第3章 塑性粘度の相違が充填性に及ぼす影響では、骨材粒径の影響を考えず、流動性、特に塑性粘度と間隙充填性の関係を明らかにした。間隙充填率と塑性粘度の関係から、フローが250mm（±5%）の場合における、各間隙幅に応じた塑性粘度の上限値を定めた。また、J漏斗流下時間およびフロー到達時間に関しても、塑性粘度との関係をもとに、上限値を定めた。

第4章では、間隙充填モルタルに含まれる骨材の粒径が間隙充填性に及ぼす影響を検討した。2.5 今年度の検討課題でも述べたとおり、小粒径細骨材と大粒径細骨材を合わせた試料で各試験を行い、塑性粘度が低い場合に生じる架橋現象を再現することで、材料分離抵抗性の観点から間隙幅に応じた塑性粘度の下限値を定める。また、対応するJ漏斗流下時間およびフロー到達時間の下限値を定める。

また、昨年度まで行われてきた沈降分離の程度から試料の材料分離抵抗性を評価していたが、本検討ではそれに加えて水平方向の流動時における骨材の分散程度からも材料分離抵抗性を評価する。

4.2 実験概要

4.2.1 使用材料

(1) セメント

本実験では、セメントに普通ポルトランドセメント(JIS R 5210)を用いた。普通ポルトランドセメントの物理試験結果を表-4.1に示す。

表-4.1 普通ポルトランドセメントの物理試験結果

密度(g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性 (バット法)	圧縮強さ(N/mm ²)		
		水量(%)	始発(h-m)	終結(h-m)		3日	7日	28日
3.16	3300	26.1	2-15	3-15	良	31.6	48.4	66.8

(2) 細骨材

細骨材には石灰石砕砂を用いた。表-4.2 に細骨材の物理試験結果を示す。骨材粒径の相違による影響に着目して検討するため、細骨材を粒径ごとに3種類に分類した。粒径が1.2mm未満のものを小粒径細骨材、1.2mm以上のものを大粒径細骨材とし、大粒径細骨材に関しては、最大粒径が2.5mmのものと5.0mmの2種類を用意した。小粒径細骨材と大粒径細骨材の混合割合は質量比で8:2である。それぞれの粒度分布を図-4.1に示す。なお、骨材は一般に用いられているプレミックスタイプの間隙充填モルタルを模擬するため、絶乾状態で用いた。

表-4.2 小粒径細骨材の物理試験結果

名称	種類	粒径	密度(g/cm ³)		吸水率(%)
			表乾	絶乾	
小粒径細骨材	石灰石砕砂	1.2mm未満	2.58	2.54	1.50
大粒径細骨材	石灰石砕砂	1.2～2.5mm	2.58	2.54	1.50
		1.2～5.0mm	2.69	2.67	0.70

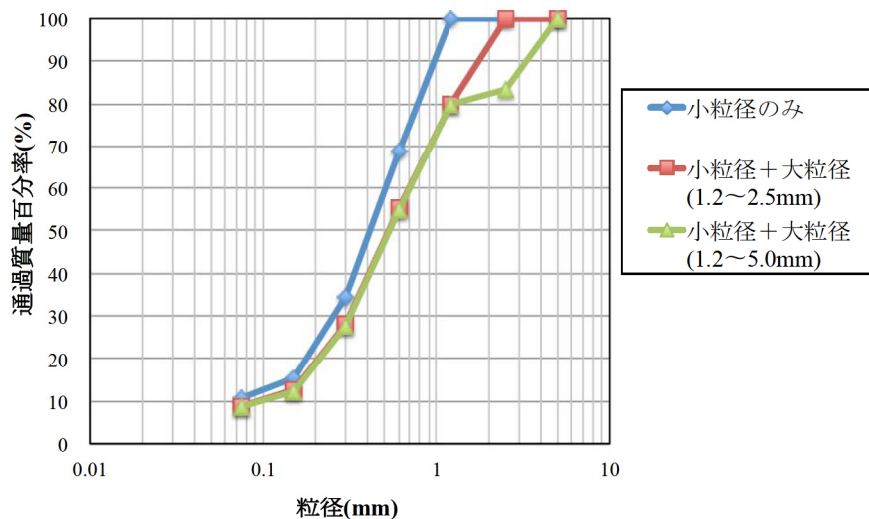


図-4.1 細骨材の粒度分布

(3) 混和剤

試料のレオロジー定数を調節するため、混和剤として高性能 AE 減水剤と増粘剤を添加した。また、練り混ぜ時に巻き込まれる空気泡を取り除くため、消泡剤を単位セメント量の 0.05% 添加した。

高性能 AE 減水剤は、ポリカルボン酸エーテル系高性能 AE 減水剤である BASF ジャパン社製のマスターグレンウム SP8SV（旧名：レオビルド SP8SV）を用いた。

増粘剤は、水溶液粘度が 190～350mPa・s（20℃、2.0%）であるメチルセルロースエーテル系増粘剤である、信越化学工業株式会社製の METOLOSE FL-30000 を用いた。

消泡剤は、消泡剤は、ポリアルキレングリコール誘導体を主成分とする BASF ジャパン社製マスターエア 404（旧名：マイクロエア 404）を使用した。

4.2.2 配合

本実験における試料の配合を表-4.3 に示す。水セメント比を 0.4、細骨材セメント比を 0.8 として一定とした。

使用骨材の粒径に着目し、S シリーズ：小粒径細骨材のみ、M シリーズ：小粒径細骨材と大粒径細骨材（1.2-2.5mm）、L シリーズ：小粒径細骨材と大粒径細骨材（2.5-5.0mm）の 3 シリーズとした。小粒径細骨材と大粒径細骨材の混合割合は質量比で 8:2 である。S シリーズに関しては、M シリーズの配合をもとに大粒径細骨材を抜いたものである。

増粘剤の添加量に応じて高性能 AE 減水剤の添加量を調節し、各配合のフローが 250mm（誤差 5%以内）となるようにした。なお、高性能 AE 減水剤は 4 倍希釈、消泡剤は 100 倍希釈にしたものを用いている。

表-4.3 配合

シリーズ	W/C	S/C	単位量(kg/m³)				高性能 AE 減水剤 (C× %)	増粘剤 (W× %)	消泡剤 (C× %)
			W	C	S				
					< 1.2mm	≥ 1.2mm			
S	0.4	0.8	388	969	621	0	※	※	0.05
M	0.4	0.8	388	969	621	155			
L	0.4	0.8	389	971	623	156			

※添加量の詳細は、4.3 流動性試験結果に合わせて記載する。

4.2.3 試験項目

本実験において行った試験を表-4.4に示す。各試験方法は記載の規準を基にしているが、間隙充填試験および材料分離抵抗性試験については本研究室が独自に行っている試験であるため、4.2.5 試験方法において詳しく記載する。

表-4.4 試験項目

試験項目		評価指標	試験方法
J14漏斗流下試験		漏斗流下時間(s)	JSCE-F541 準拠
JP漏斗流下試験			
簡易テーブルフロー試験 (ガラス板)		フロー(mm)	建築改修工事 監理指針 参考
		200mmおよび250mm フロー到達時間(s)	JSCE-F516 参考
簡易テーブルフロー試験 (アクリル板)		フロー(mm)	建築改修工事 監理指針 参考
粘度測定試験		塑性粘度(mPa・s) 降伏値(Pa)	JIS Z 8803 準拠
間隙充填性試験		間隙充填率(%)	別途記載
材料分離抵抗性試験	沈降分離試験	鉛直分離抵抗指数SR _V	
	段差フロー試験	水平分離抵抗指数SR _H フロー(mm)	

4.2.4 練混ぜ方法

図-4.2に示すように、予めセメントと絶乾状態の細骨材を混合したものを前日に用意し、他の材料とともに室温 20℃の部屋にて一晩静置した。

室温は 20℃、1 バッチあたりの練り量は 10L とし、増粘剤は練混ぜ直前に混合した。図-4.3に示すハンドミキサー (1100rpm) で水を攪拌しながら、上述の混合材料を 1 分程度かけて塊にならないように注意して投入し、全量投入後、3 分間練り混ぜた。練混ぜは全配合において筆者が行い、各配合で練混ぜ方に大きな差が生じないように注意して行った。



図-4.2 予め混合された材料



図-4.3 ハンドミキサー

4.2.5 試験方法

(1) J 漏斗流下試験

J14 漏斗流下試験は JSCE-F 541 に、JP 漏斗流下試験は JSCE-F 531 に、それぞれ準拠して行なった。J14 漏斗と JP 漏斗を図-4.3 に示す。

試験手順は、まず漏斗を鉛直に支持し、水を通して濡らす。試料を漏斗内に注ぎ、流出口から適量の試料を流出させたのち、指で流出口を押さえ、試料を上面まで注いだ後、上面をならす。

指を離し試料を流出させ、試料がはじめて途切れるまでの流下時間を測定した。なお、閉塞等により漏斗内の残留分が多い場合、その試料は不適とした。

実験では引き続いて2回目を行い、その平均値をJ漏斗流下時間とした。また、1回目と2回目の流下時間の差が大きい場合は引き続き3回目を行い、外れ値を除いた平均値を流下時間とした。

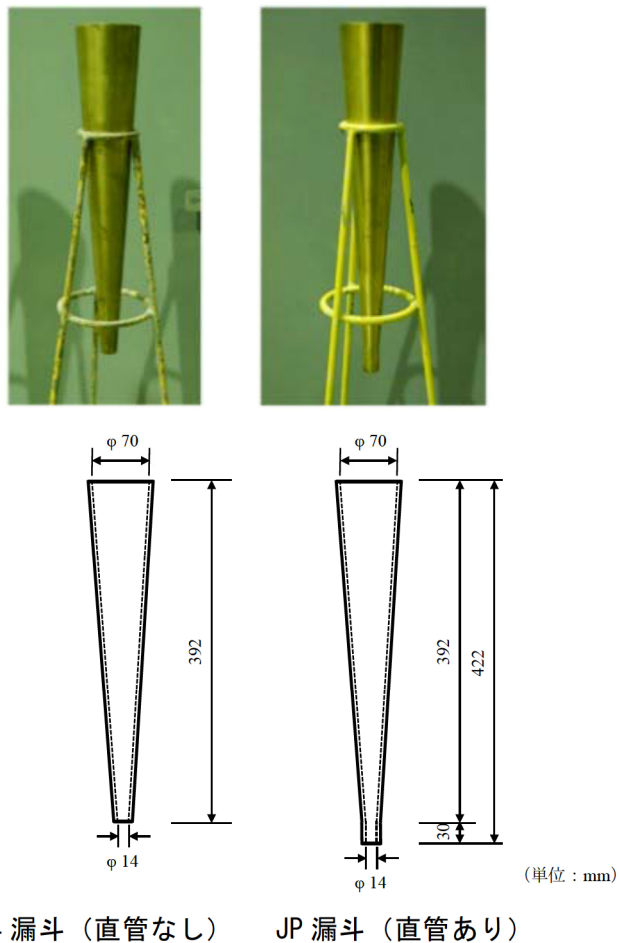


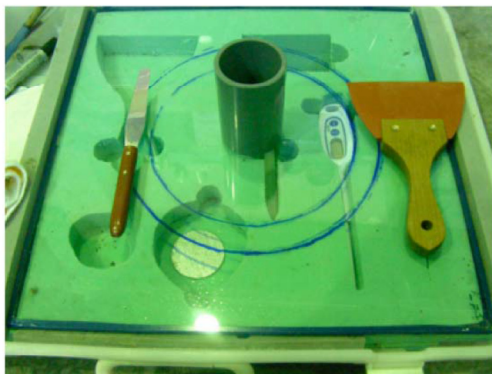
図-4.3 J14 漏斗と JP 漏斗

(2) 簡易テーブルフロー試験

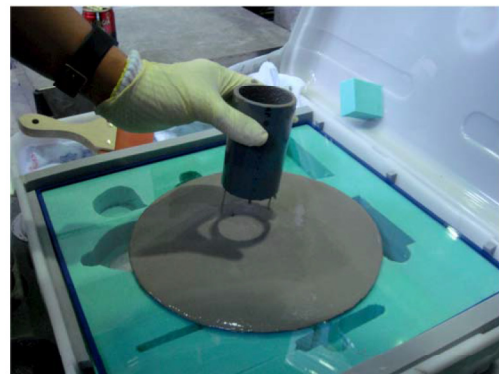
簡易テーブルフロー試験（以下、フロー試験）は、建築改修工事監理指針および JSCE-516「高流動コンクリートの 500mm フロー到達時間試験方法（案）」を参考にして行った¹⁾。図-4.4 に試験器具および試験の様子を示す。

試験の手順は以下のとおりである。はじめに、ガラス板を水平に支持し、乾いた布で表面を拭く。次に、ガラス板上に内径 50mm、高さ 100mm の塩化ビニル製の円筒容器を置き、試料を充填する。円筒容器を引き上げ、フローが 200mm および 250mm に到達する時間をフロー到達時間とした。3 分後、2 方向（最長部およびそれに直交する方向）の直径を測定し、その平均値をフローとした。

また、現場での利便性を考慮し、ガラス板の他にアクリル板でも同様に試験を行い、フローを測定した。



(a) フロー試験器具



(b) 間隙充填モルタルのフローの様子

図-4.4 フロー試験の様子

(3) 粘度測定試験

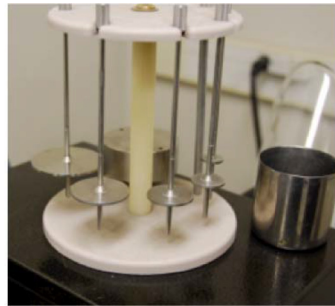
粘度測定試験に用いた B 型 (円筒ロータ式) 回転粘度計を図-4.5 に、試験の様子を図-4.6 に示す。また、レオロジー定数の測定例を図-4.7 に示す。

塑性粘度は、H4 ロータを使用し、回転数 50rpm、測定時間を 60 秒とし、15 秒ごと測定し、その平均値とした (0s、15s、30s、45s、60s の 5 点)。

降伏値は、主に H4 ロータを使用し、回転数を 20rpm、50rpm、100rpm の 3 水準、測定時間を 60 秒とし、15 秒ごとに測定した。回転数ごとに得られた平均ずり応力(Pa)と回転数(rpm)の関係をプロットし、近似式の傾きと切片から降伏値を算出した。なお、試料の粘性によって、測定条件を変更する必要があるため、使用ロータを H3 ロータや H5 ロータに変更、もしくは、回転数を 10rpm、20rpm、50rpm などに変更して測定した。



(a) 本体



(b) 使用ロータ

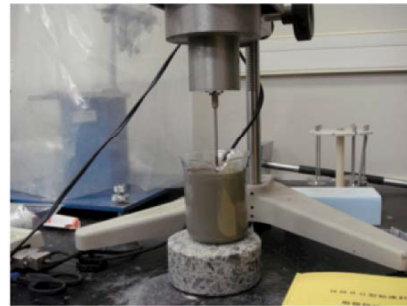


図-4.6 粘度測定試験の様子

図-4.5 B 型回転粘度計

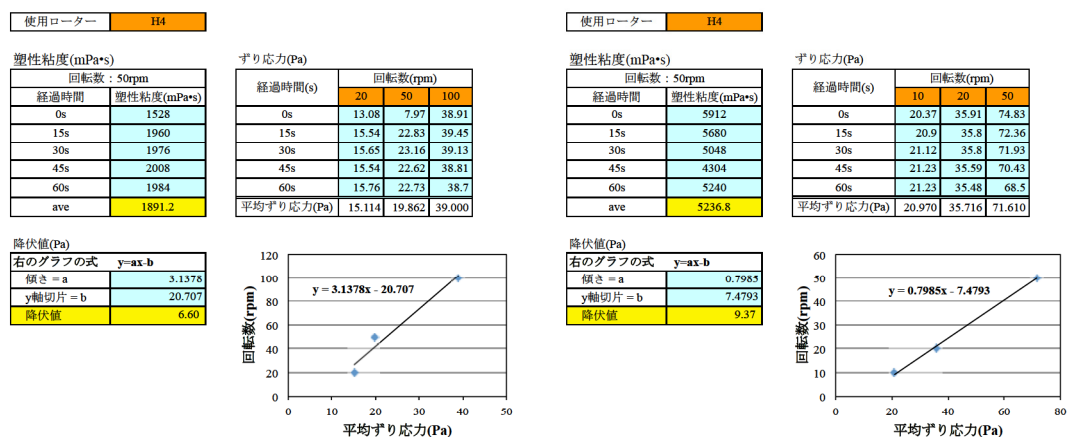


図-4.7 レオロジー定数の測定例

(4) 間隙充填性試験

本研究では、既往の研究³⁾を参考に、間隙充填性の評価を図-4.8に示す二重円筒式間隙充填性試験装置にて行った。装置は2本のアクリルパイプ（内パイプおよび外パイプ）から構成されており、間隙幅は外パイプの径のみを変化させて調節した。内パイプと外パイプの内径および外径を表-4.5に示す。また、試験の様子を図-4.9に示す。

また、間隙幅は第3章 塑性粘度の相違が充填性に及ぼす影響における検討と同様に、5mm以下の間隙幅に着目し、2、3、および5mmの間隙幅を対象とした。

試験手順を以下に示す。

- 1) 高さ500mm、内径30mmの内パイプに試料（約320ml）を上縁から50mm下がった位置（外パイプの高さ）まで投入する。
- 2) 試料投入後、内パイプを間隙幅（2、3、5mm）に相当する分だけ上方に引き上げ、内パイプ内の試料の自重により、内パイプと外パイプの間隙に充填させる。
- 3) 試料が内パイプから、内パイプと外パイプの間隙へ流動して上昇した高さを測定し、充填高さとした。内パイプ中の試料と外パイプ中の試料の高さが等しくなった時の高さを理論充填高さとし、充填高さを理論充填高さで除した値を間隙充填率と定義した。理論充填高さは以下に示す式を用いて算出した。また、試料投入の際、試料を所定の高さを超えて投入してしまった場合、所定の高さから超えた分を補正值として記録し、間隙充填率に補正をかけた。

$$h_t = \frac{d_1^2(h_0 + h') - d_3^2 \times B}{d_3^2 - d_2^2 + d_1^2} + B$$

h_t :理論充填高さ(mm)、 h_0 :試料投入の所定の高さ(mm)、 h' :補正值(mm)

d_1 :内パイプ内径(mm)、 d_2 :内パイプ外径(mm)、 d_3 :外パイプ内径(mm)、 B :間隙幅(mm)

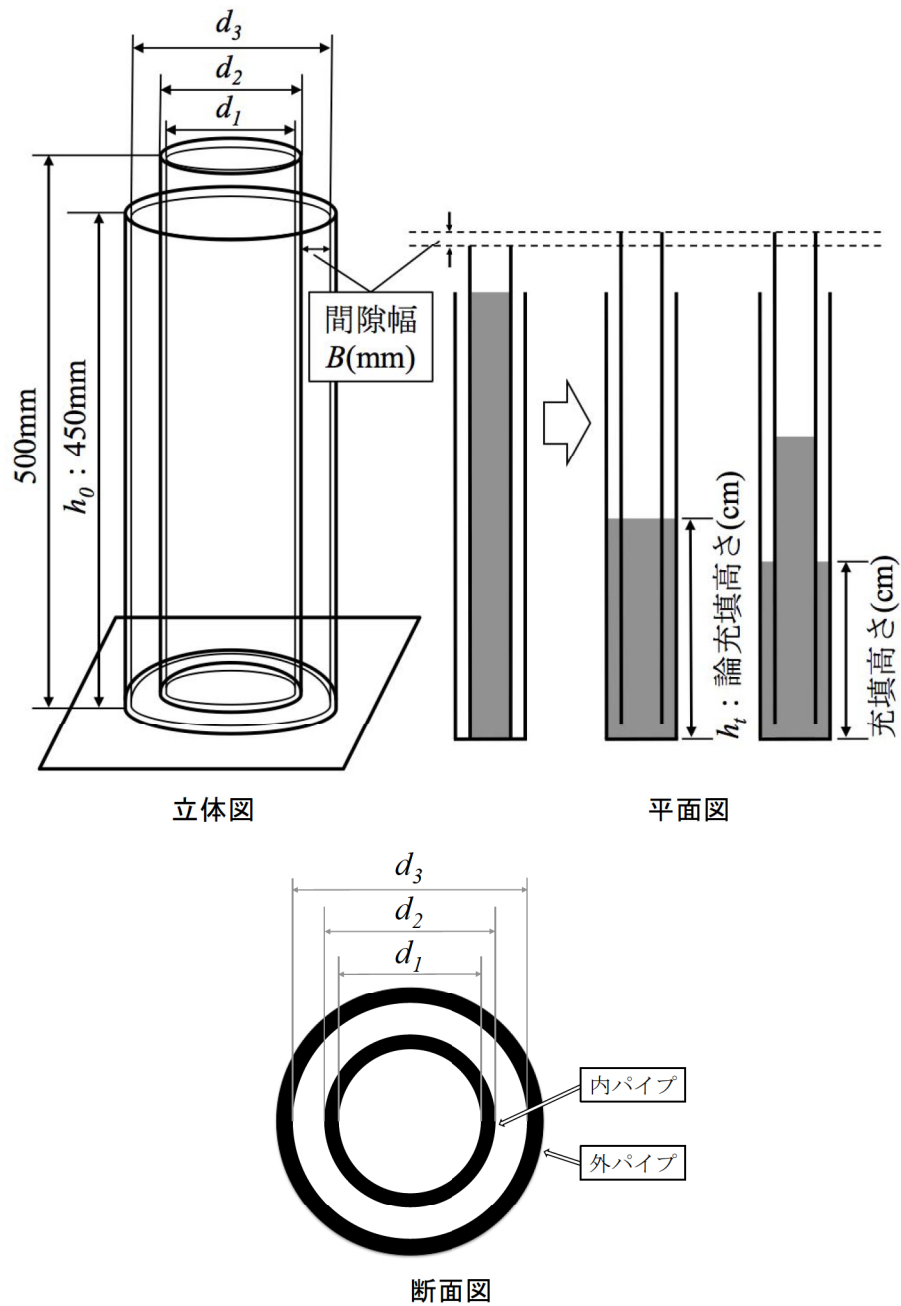


図-4.8 二重円筒式モルタル間隙充填性試験装置概略図

表-4.5 アクリルパイプの寸法

B : 間隙幅(mm)	内パイプ寸法(mm)			外パイプ寸法(mm)		
	d_1 : 内径	d_2 : 外径	高さ	d_3 : 内径	外径	h_0 : 高さ
2	30	40	500	44	54	450
3				46	56	
5				50	60	



図-4.9 間隙充填試験の様子

(5) 材料分離抵抗性試験

材料分離抵抗性は、沈降による骨材の分離が影響する鉛直方向の材料分離抵抗性と、流動時の骨材の分離が影響する水平方向の材料分離抵抗性に分けて考えた。

(a) 沈降分離試験

鉛直方向の材料分離抵抗性については、2.3.4に示したJ14漏斗を用いた試験³⁾を行った。試験概要を図-4.10に、試験の様子を図-4.11示す。漏斗内を試料で満たし、1分間静置した後、流出初期の200ml (A) と、残りの430ml (B) に分けて採取した。セメント分を洗い流し、骨材のみを絶乾状態にした後、1.2mmふるいにかけて、残留骨材の質量を測定した。(A)、(B)に含まれていた大粒径細骨材の質量を、それぞれXg, Ygとし、単位体積あたりの大粒径細骨材の質量を(X/200)g/ml、(Y/430)g/mlとした。両者の比較から、以下の式を用いて鉛直分離抵抗指数 SR_V を定義し、沈降に対する鉛直方向の材料分離抵抗性の指標とした。

$$SR_V = (X / 200) / (Y / 430)$$

ここで、X：流出初期の試料 (A) に含まれる大粒径細骨材の絶乾質量(g)

Y：残りの試料 (B) に含まれる大粒径細骨材の絶乾質量(g)

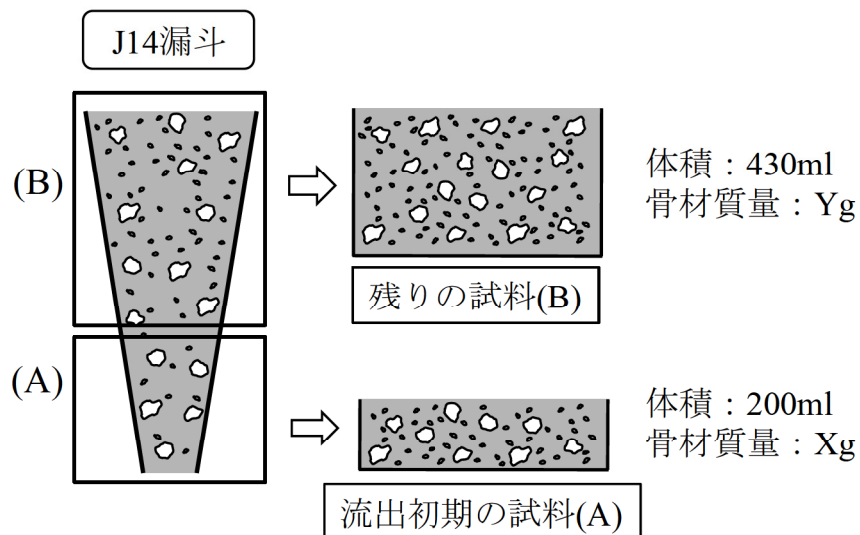


図-4.10 沈降分離試験概要図



(1) 漏斗内を試料で満たす



(2) 1 分間静置する



(3) 流出初期の 200ml を採取①



(4) 流出初期の 200ml を採取②



(5) 残りの試料を採取①



(6) 残りの試料を採取②

図-4.11 沈降分離試験の様子

(b) 段差フロー試験

通常のフロー試験に加えて、段差を設けたフローテーブルにてフロー試験を行う段差フロー試験を行った。これは、試料が段差を下る際に、骨材を意図的に分離させ、その様子を骨材の分布状況から把握することを目的として実験的に行った。また、骨材分布状況から、水平方向の材料分離抵抗性を定量的に評価した。

試験概要を図-4.12、試験の様子を図-4.13に示す。高流動コンクリートにおけるスランプフロー試験後の骨材分布についての検討⁴⁾を参考に、統一フローである250mmの60%である150mmを内側と外側の境界とした。

φ150mm、厚さ1mmの亚克力円盤を、亚克力板のフローテーブルの中心に据え、同様にフロー試験を行った。試験後、円盤部を持ち上げ、フローの内側と外側に試料を分け、沈降分離試験と同様に大粒径細骨材の質量を測定した。なお、円盤部を持ち上げやすくするため、円盤と亚克力板の間に1mmのスペーサーを入れている。

フローを円形と仮定し、フローの値から面積を算出した。外側と内側に含まれていた大粒径細骨材の質量を、それぞれ Xg 、 Yg とし、単位面積当たりの骨材の質量をそれぞれ $\{X/(r^2-75^2)\pi\} g/cm^2$ 、 $(Y/75^2\pi) g/cm^2$ とした。両者の比較から、以下の式を用いて水平分離抵抗指数 SR_H を定義し、流動に対する材料分離抵抗性の指標とした。

$$SR_V = \{X/(r^2-75^2)\} / (Y/75^2)$$

ここで、 X ：フローの外側の試料に含まれる大粒径細骨材の絶乾質量(g)

Y ：フローの内側の試料に含まれる大粒径細骨材の絶乾質量(g)

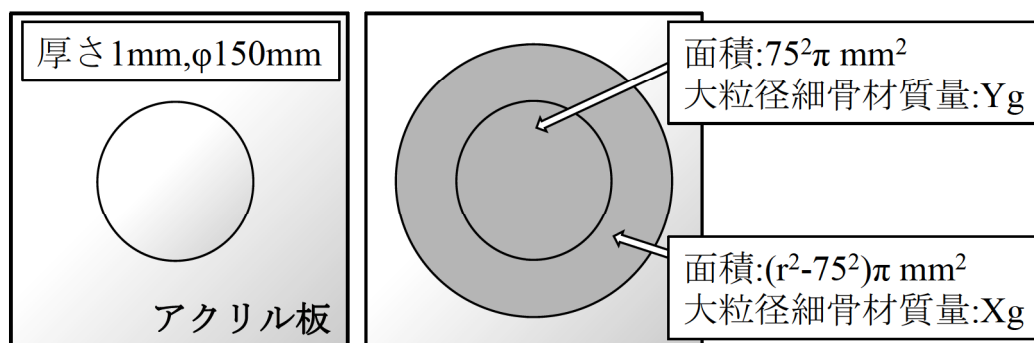


図-4.12 段差フロー試験概要図



図-4.13 段差フロー試験の様子

4.3 流動性試験結果

4.3.1 全試験結果

全試験結果を表-4.6に示す。第3章と同様に、フローを250mm程度（誤差±5%以内：237.5～262.5mm）に統一し、その上でそれぞれ塑性粘度の異なる試料を作製した。本検討においても、フローが237.5～262.5mmの範囲に入らなかった配合に関しては各試験を行っていない。なお、Sシリーズは第3章の試料と同一であり、骨材粒径の影響のないことから、MシリーズとLシリーズとの比較対象とした。

なお、Lシリーズに関しては、3.3.2 混和剤の添加量に示す高性能 AE 減水剤の添加量の限界によって、塑性粘度が4000mPa・sを超えるような試料を作製できなかった。

表-4.6 試験結果

Series	No.	増粘剤 (W×%)	SP (C×%)	判定	フロー試験				J漏斗流下試験		間隙充填性試験			材料分離抵抗性試験				粘度測定試験	
					±2%→◎ ±5%→○ 他→×									沈降分離試験		段差フロー試験		塑性粘度 (mPa・s)	降伏値 (Pa)
					フロー(mm)		フロー到達時間(s)		漏斗流下時間(s)		充填率(%)			鉛直分離抵抗 指数SR _v	フロー (mm)	水平分離抵抗 指数SR _h			
					ガラス板	アクリル板	200mm	250mm	J14	JP	2mm	3mm	5mm						
S	1	0.10	0.7	○	256	247	0.31	5.72	4.09	5.13	93	95	100	-	-	-	995.2	6.49	
	2	0.20	0.8	◎	247	-	2.14	-	5.51	7.87	92	92	99	-	-	-	1756.8	8.10	
	3	0.30	1.2	○	257	263	2.71	37.78	7.59	11.70	88	95	99	-	-	-	2169.6	8.47	
	4	0.35	1.5	○	257	261	4.00	41.60	9.27	14.66	88	91	99	-	-	-	2798.4	9.08	
	5	0.40	1.7	◎	255	252	3.53	92.90	12.91	19.85	90	91	96	-	-	-	3568.0	5.50	
	6	0.45	2.2	○	257	261	6.18	119.82	15.35	23.62	89	92	96	-	-	-	4350.4	10.22	
	7	0.48	2.3	◎	254	255	9.12	146.83	18.14	29.23	88	90	94	-	-	-	5065.6	17.78	
	8	0.50	2.5	◎	252	251	9.16	172.34	18.79	30.62	85	88	94	-	-	-	5262.4	16.03	
	9	0.55	2.8	◎	247	250	17.12	-	25.84	44.30	81	87	92	-	-	-	6963.2	21.51	
M	1	0.10	0.7	◎	254	254	0.65	27.56	4.92	6.21	9	97	99	1.15	278	1.42	1217.6	7.01	
	2	0.20	0.9	◎	254	257	1.62	19.82	5.86	9.04	35	95	99	1.22	280	1.41	1675.2	6.32	
	3	0.30	1.2	◎	248	248	3.81	19.69	9.12	13.65	24	94	98	1.28	275	1.71	2798.4	11.49	
	4	0.35	1.5	◎	251	255	4.87	115.94	11.63	18.39	55	90	99	1.27	277	1.23	2844.8	11.47	
	5	0.40	1.8	◎	250	254	6.43	112.23	14.23	23.70	15	89	92	1.10	273	1.48	3377.6	11.56	
	6	0.40	1.8	◎	251	253	8.46	131.54	16.61	28.14	15	87	94	1.25	271	1.61	4344.0	12.38	
	7	0.45	2.4	◎	247	255	10.28	-	19.28	31.75	26	87	96	1.17	274	1.39	5236.8	9.37	
	8	0.50	3.0	○	243	248	12.92	-	24.80	42.38	47	86	91	1.10	265	1.22	6443.2	11.49	
L	1	0.10	0.9	◎	248	252	0.47	-	3.93	5.23	5	27	25	1.54	283	1.21	1052.8	6.20	
	2	0.20	1.2	○	238	241	2.17	-	5.48	7.93	12	20	31	1.38	288	1.60	1712.0	7.80	
	3	0.30	1.6	○	239	239	4.52	-	8.72	13.36	10	33	92	1.53	266	1.07	2646.4	10.78	
	4	0.35	2.1	○	242	236	6.04	-	12.15	19.00	13	38	93	1.47	280	1.08	2875.2	10.78	
	5	0.40	2.6	×	228	229	8.97	-	15.53	25.86	12	25	88	-	-	-	4011.2	14.19	
	6	0.40	3.0	×	234	228	10.44	-	16.00	25.89	4	22	87	-	-	-	4384.0	14.32	
	7	0.40	4.5	◎	247	234	10.60	-	16.33	25.26	14	11	83	2.17	278	1.11	3668.8	13.39	
	8	0.40	5.0	○	256	239	6.16	-	12.73	20.25	18	29	76	-	-	-	2989.2	12.38	
	9	0.45	6.0	×	227	219	8.92	-	13.73	23.09	20	52	76	-	-	-	3510.4	23.41	

4.3.2 混和剤の添加量

増粘剤の添加量と塑性粘度の関係を図-4.14に示す。同一配合の場合、骨材の粒径によらず、増粘剤の添加量と塑性粘度には高い相関が認められる。しかし、添加量が増大していくにつれ、MシリーズおよびLシリーズは、塑性粘度の増加の程度が大きくなる。また、MシリーズのNo.5とNo.6は添加量が同一にもかかわらず、塑性粘度が1000mPa・s程度異なる。これは、作用しきれていない増粘剤が存在したことによると考えられる。

また、増粘剤の添加量と高性能AE減水剤（SP）の添加量の関係を図-4.15に示す。増粘剤の添加量に対して、フローを250mmにするための高性能AE減水剤の添加量は、骨材粒径の影響を受けることがわかる。Sシリーズは概ね比例関係にあるが、MシリーズおよびLシリーズに関しては、指数関数的に高性能AE減水剤の添加量が増大する。

つまり、骨材の粒径が大きくなると、同一の流動性を確保するためには高性能AE減水剤がより多く必要になる。しかし、3.3.2 混和剤の添加量に示すように、高性能AE減水剤の添加量には限界値が存在すると考えられる。このため、本検討のように増粘剤の添加量のみで塑性粘度を変化させ、高性能AE減水剤の添加量でフローを調整する、といった手法には限界がある。混和剤の種類によってもその限界値は異なると考えられるため、さらなる検討が望まれる。

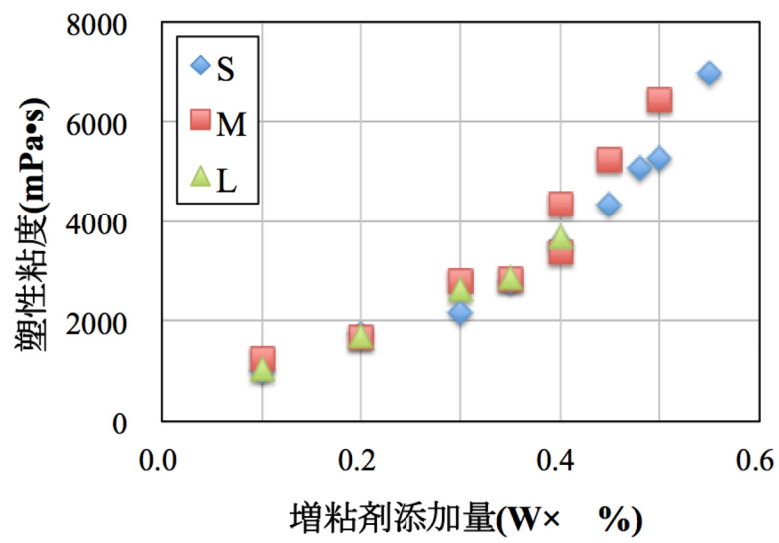


図-4.14 増粘剤添加量と塑性粘度の関係

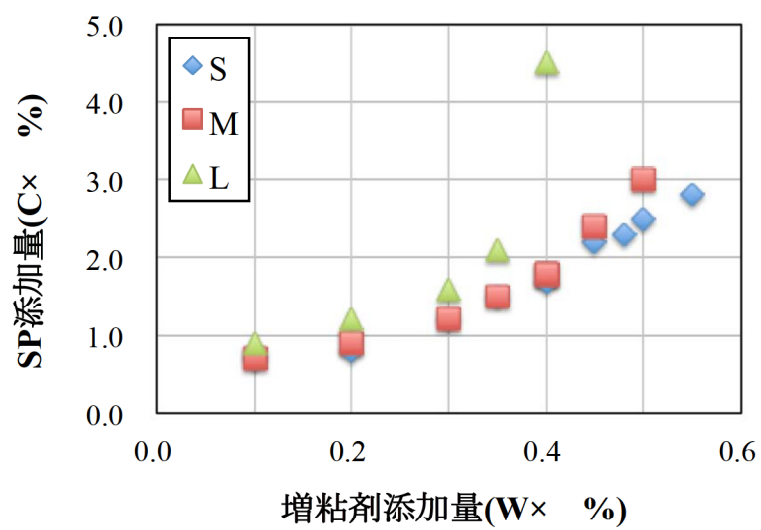


図-4.15 高性能 AE 減水剤添加量と増粘剤添加量の関係

4.3.3 降伏値と塑性粘度

試料の降伏値と塑性粘度の関係を図-4.16に示す。3.3.3 降伏値と塑性粘度に示すとおり塑性粘度と降伏値には正の相関が認められることが多く、本検討においてもフローを統一しているにも関わらず、両者には相関が認められる。しかし、骨材粒径の影響によって、降伏値の変化に差があることがわかる。M シリーズに着目すると、S シリーズや L シリーズに比べると降伏値は 10Pa 前後で変化している。このことから、フロー250mm に対応する降伏値がおおよそ 10Pa であることがわかる。

また、3.3.4 フローとレオロジー定数に示したとおり、回転粘度計によって求めた降伏値とフローの間には相関が必ずしも認められず、高性能 AE 減水剤でフローを意図的に大きくするとき、降伏値の値は意味を持たず、充填性を評価することはできない。

以上より、本検討では、各試験結果とレオロジー定数の関係についての考察から、降伏値との関係を省略する。

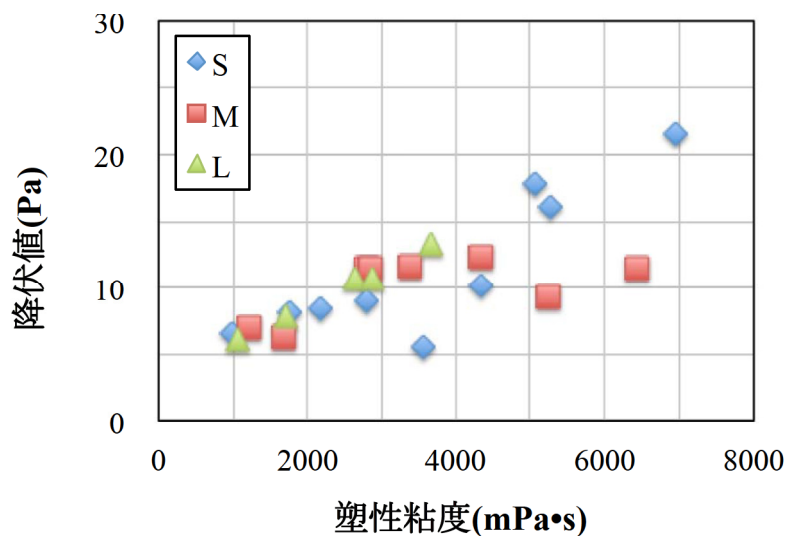


図-4.16 降伏値と塑性粘度の関係

4.3.4 流動性試験結果と塑性粘度

(1) フローと塑性粘度

フローと塑性粘度の関係を図-4.17に示す。本検討ではフローを250mmに統一し、塑性粘度の異なる試料を作製した。図に示すように、フローが同一でも塑性粘度の異なる間隙充填モルタルは作製可能であり、また、フロー試験のみでは塑性粘度の評価ができず、フローのみでは充填性を適切に評価できないことが改めて明らかとなった。

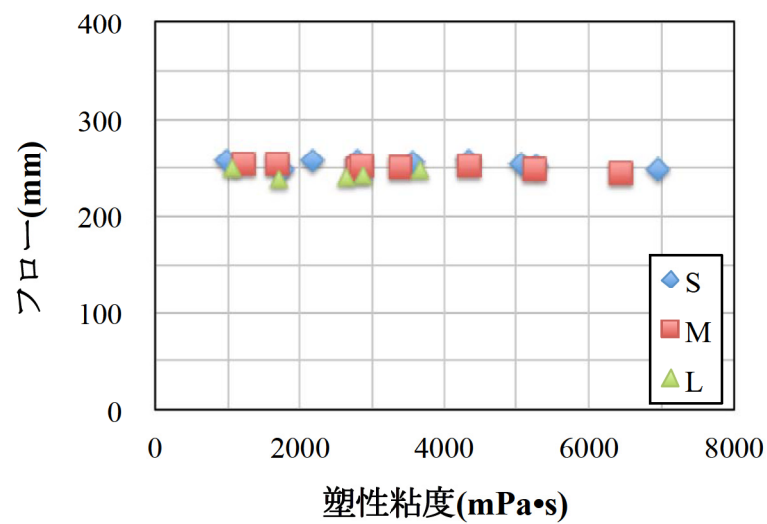


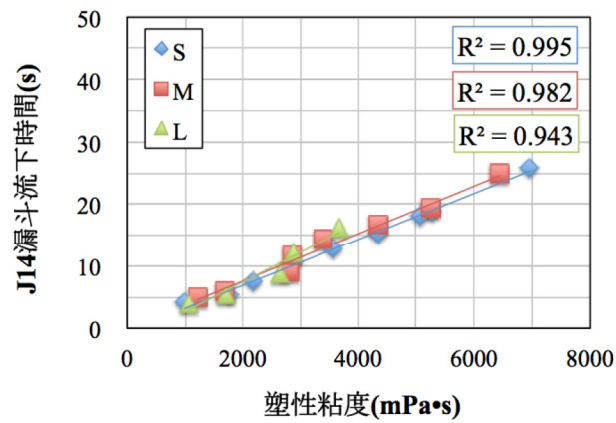
図-4.17 フローと塑性粘度の関係

(2) J 漏斗流下時間と塑性粘度

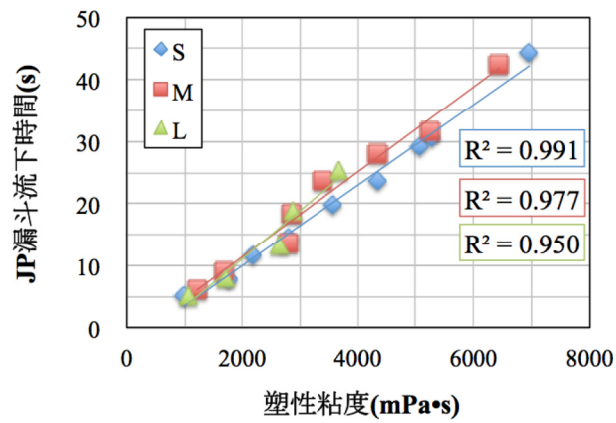
J 漏斗流下時間と塑性粘度の関係を図-4.18 に示す。3.3.5 J 漏斗流下時間とレオロジー定数に示したように、S シリーズは J 漏斗流下時間と塑性粘度の間に高い相関が認められ、M シリーズおよび L シリーズに関しても、両者の間に非常に高い相関が認められる。粒径が大きくなるごとに、相関係数がわずかながら低下するが、本検討の範囲では骨材粒径の影響はないと考えられる。

つまり、同一の配合で、混和剤の添加量で流動性を調整した間隙充填モルタルでは、J 漏斗流下時間に対して粒径の影響がないことがわかる。

また、J14 漏斗流下時間と JP 漏斗流下時間の関係を図-4.19 に示す。両者の間には高い相関が認められ、どちらの漏斗を用いても塑性粘度を評価することは可能である。JP 漏斗は流出口に直管部を有しているため、J14 漏斗に比べ、流下時間が長くなり、塑性粘度が高くなるにつれ、J14 漏斗流下時間と JP 漏斗流下時間の差は大きくなる。そのため、J14 漏斗よりも JP 漏斗の方が、流動性の差を明確に示すことが可能である。



(a) J14 漏斗流下時間



(b) JP 漏斗流下時間

図-4.18 J 漏斗流下時間とレオロジー定数の関係

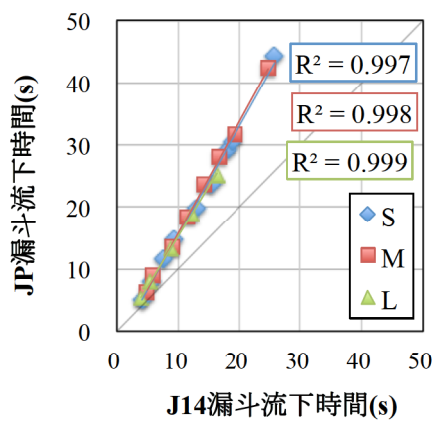


図-4.19 J14 漏斗流下時間と JP 漏斗流下時間の関係

(3) フロー到達時間と塑性粘度

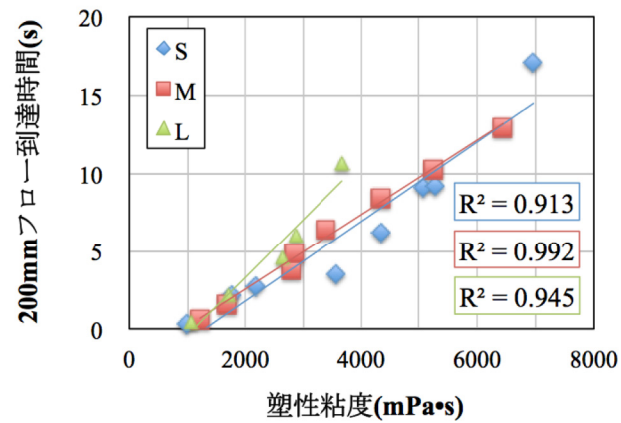
フロー到達時間と塑性粘度の関係を図-4.20に示す。3.3.6 フロー到達時間とレオロジー定数に示したように、Sシリーズはフロー到達時間と塑性粘度の間に高い相関が認められる。また、MシリーズおよびLシリーズは、200mmフロー到達時間と塑性粘度には高い相関が認められる。粒径が大きくなるごとに、相関係数がわずかながら低下するが、本検討の範囲では骨材粒径の影響はないと考えられる。つまり、同一の配合で、混和剤の添加量で流動性を調整した間隙充填モルタルでは、フロー到達時間に対して粒径の影響がないことがわかる。

しかし、Mシリーズは比較的フローが小さく、Lシリーズは全配合でフローが250mmに到達していないため、250mmフロー到達時間はばらつきが大きくなる。フローが250mmに到達しない場合、もしくは到達するが、到達までの時間が非常に長い場合があり、その測定精度は測定者に委ねられてしまう。

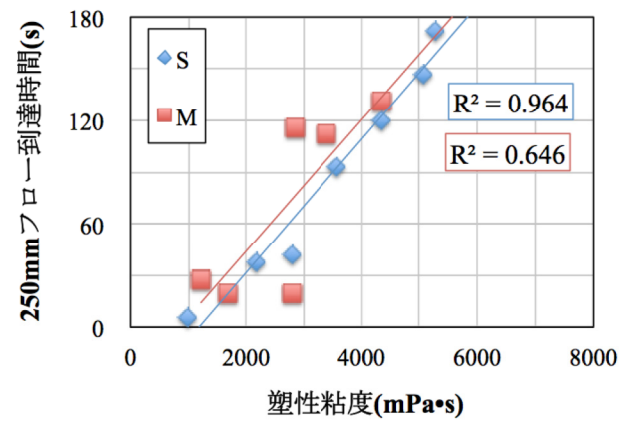
このように、本検討のようにフローが250mm程度である場合、200mmフロー到達時間や、250mmフロー到達時間は適切に測定できないことが改めて問題視される。

また、200mmフロー到達時間と250mmフロー到達時間の関係を図-4.21に示す。2.4.4 昨年度までの検討に示したように、200mmフロー到達時間と250mmフロー到達時間は異なる性状を評価しているとの仮説が立てられたが、本検討では両者の間には高い相関が認められることから同一の性状を表していると考えられる。

間隙充填モルタルの使用方法は様々であり、それらの要求性能も様々であるが、どの使用法においても概ねフローが250mm以上でないと要求性能に満たないと考えられる。要求されたフローの値やJ漏斗流下時間に応じて、到達時間を計測する長さを適宜判断することが重要である。その際は、200mm、250mm、300mmを目安に計測し、比較することが望ましい。



(a) 200mm フロー到達時間



(b) 250mm フロー到達時間

図-4.20 フロー到達時間とレオロジー定数の関係

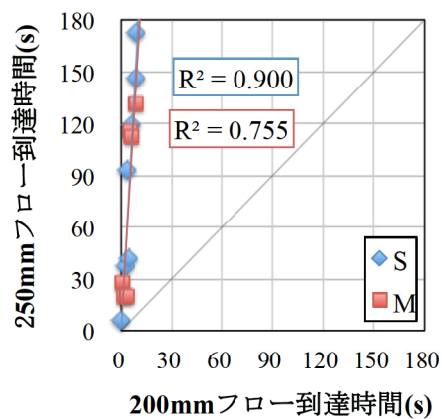


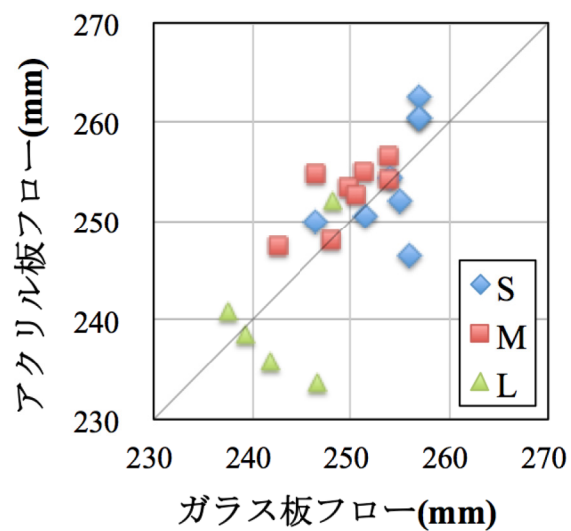
図-4.21 200mm フロー到達時間と 250mm フロー到達時間の関係

4.3.5 ガラス板フローとアクリル板フロー

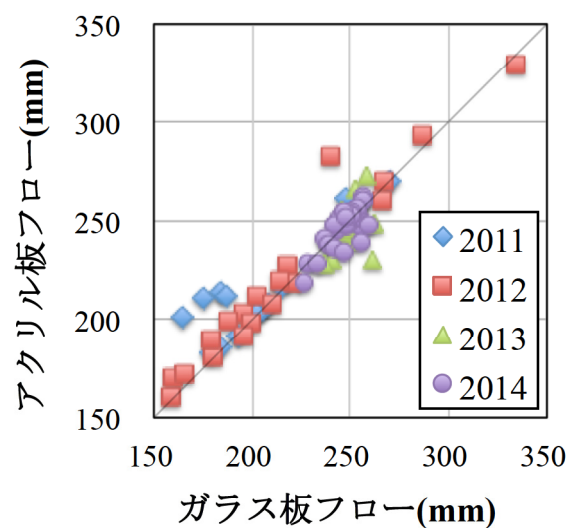
ガラス板フローとアクリル板フローの関係を図-4.22(a)に示す。両者の間には相関が認められ、最大でも15mm以下の誤差に収まっていることがわかる。Lシリーズはアクリル版フローの方が小さくなる傾向があるが、全体で見ると誤差の範囲だと考えられる。

また、3.3.7 ガラス板フローとアクリル板フローに示したとおり、アクリル板は繰り返しの使用による表面の摩耗が生じて、表面状態が変化する可能性が考えられる。過去の同試験の結果を合わせて図-4.22(b)に示す。4年間を通して同一のアクリル板を繰り返し使用しているが、大きく値が異なることは少なく、今年度の結果と合わせても、ガラス板フローとアクリル板フローの差は小さいと判断できる。

以上より、アクリル板をガラス板の代替として用いることは十分可能であると考えられる。今後の研究においてもアクリル板フロー試験を実施し、データを蓄積していくことで、アクリル板を用いたフロー試験を提案していくことが望ましい。



(a) 今年度の検討



(b) まとめ

図-4.22 ガラス板フローとアクリル板フローの関係

4.4 流動性が充填性に及ぼす影響

4.4.1 間隙充填率と塑性粘度の関係

全シリーズの間隙充填率と塑性粘度の関係を、間隙幅ごとに図-4.23に示す。Sシリーズの結果と、MシリーズおよびLシリーズの結果と比較することで、骨材粒径の影響を考慮した上で、それぞれの充填性を評価した。また、3.4.1 間隙充填率とレオロジー定数に示したとおり、間隙充填率90%を目安に充填と判断した。

(a) 間隙幅 2mm

Mシリーズは、粒径2mm以上の骨材が含まれているが、塑性粘度によって間隙充填率が変化することがわかる。しかし、全ての試料において、間隙充填率が90%に満たないことから、Mシリーズでは間隙幅2mmを充填できないと判断した。

Lシリーズは、明らかに最大粒径が間隙幅より大きいことから、塑性粘度によらず、未充填となった。

(b) 間隙幅 3mm

Mシリーズは、Sシリーズと同様の変化を示しており、間隙幅3mmに対しては粒径の影響がなく、充填可能である。

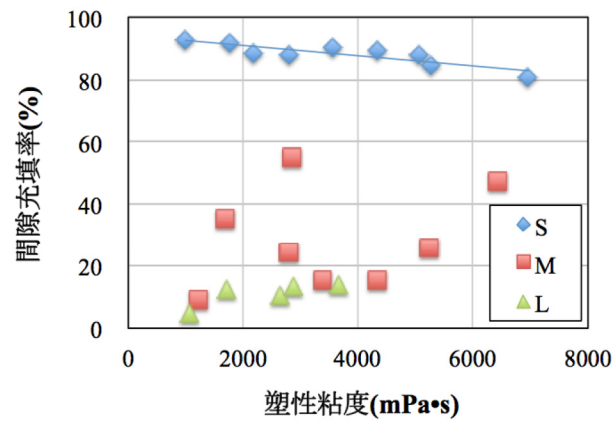
Lシリーズは、間隙幅2mmに対するMシリーズと同様に、塑性粘度によって間隙充填率が変化するが、90%に満たないため、間隙幅3mmを充填できないと判断した。

(c) 間隙幅 5mm

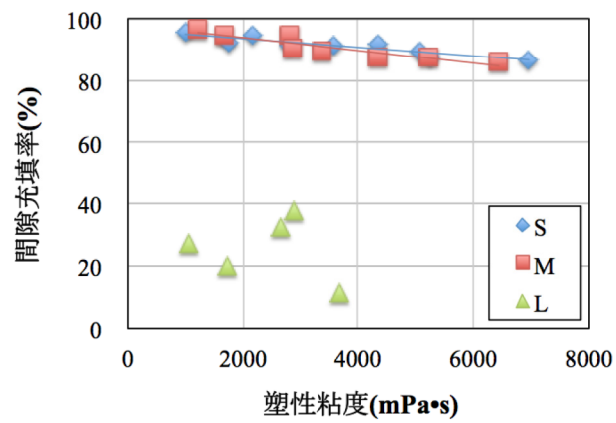
Mシリーズは、Sシリーズと同様の変化を示しており、間隙幅5mmに対しては粒径の影響がなく、充填可能である。

Lシリーズは、塑性粘度が2500mPa・s程度を境に間隙充填率が急激に変化していることがわかる。これは、塑性粘度が低い試料では、骨材が間隙内で架橋現象を起こし、未充填となったことによると考えられる。

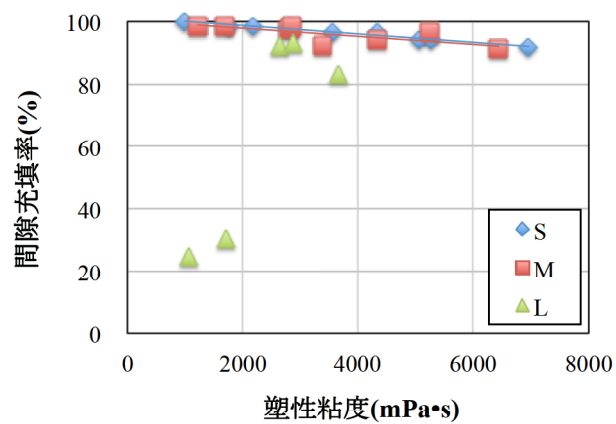
以上より、間隙充填率90%未満を未充填とすると、間隙幅5mmに対する塑性粘度の下限値を2500mPa・s程度と定めることができる。3.4.1 間隙充填率とレオロジー定数に示した近似式より、塑性粘度2500mPa・sに対応するJ14漏斗流下時間は9秒程度、JP漏斗流下時間は13秒程度、200mmフロー到達時間は4秒程度である。なお、間隙幅2mmおよび3mmにおいても、同様に下限値を定めることが可能であると考えられるが、本検討の範囲でそれらを示すデータは得られなかった。



(a) 間隙幅 2mm



(b) 間隙幅 3mm



(c) 間隙幅 5mm

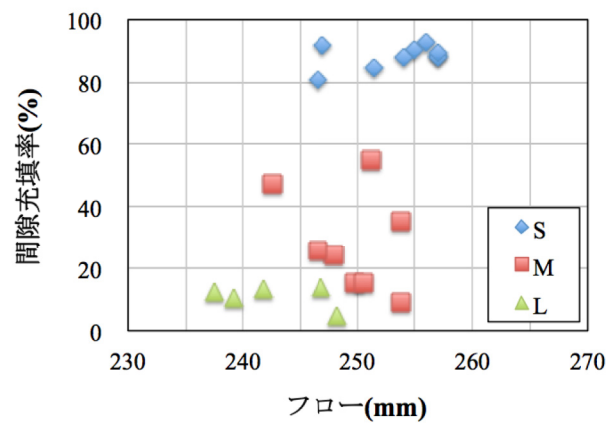
図-4.23 間隙充填率と塑性粘度の関係

4.4.2 間隙充填率とフロー

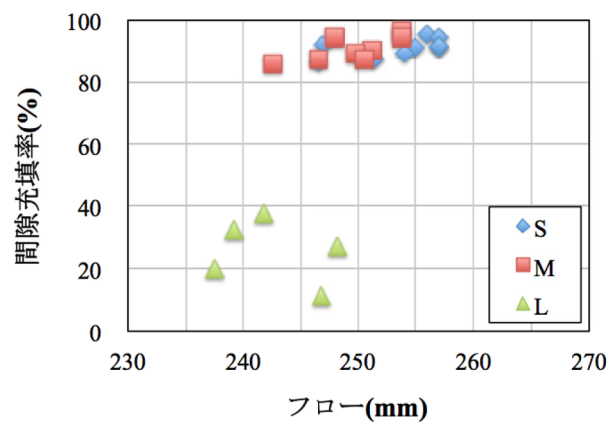
間隙充填率とフローの関係を図-4.24に示す。3.4.3 間隙充填率とフローに示したとおり、フローを一定の値に統一したとき、間隙充填率とフローの間には相関は見られない。粒径の異なる骨材を用いた本検討においても同様で、たとえば、間隙幅 5mm における L シリーズに着目すると、フローが近い値でも間隙充填率が大きく異なることがある。よって、フローのみで間隙充填性を評価することは適切でないことが改めて明らかとなった。

また、2.4.4 昨年度までの検討に示したとおり、間隙幅 2mm に着目した場合、フロー 250mm 程度が充填性の境界であることが示されていることから、本検討ではフローを 250mm に統一した。今後、フローを 200mm や 300mm に統一した試料を作製して、同様の検討を行うことで、各間隙幅を充填するのに必要なフローの下限值が得られると考えられる。

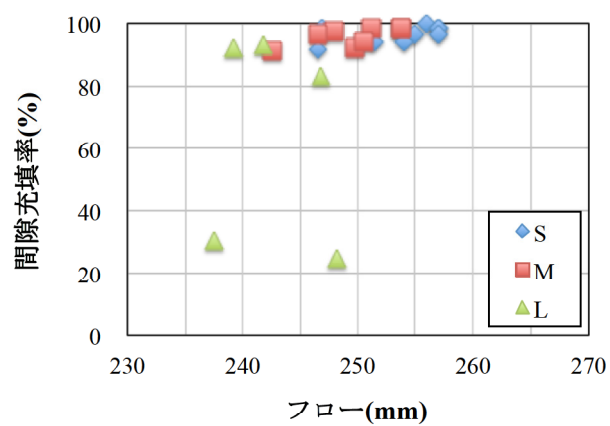
フローはある間隙幅を充填する際に、最低限満たすべき条件として扱われるべきであり、その上で、塑性粘度や骨材粒径などの影響を考慮し、間隙充填モルタルの充填性に関して評価を行うことが望ましい。



(a) 間隙幅 2mm



(b) 間隙幅 3mm



(c) 間隙幅 5mm

図-4.24 フロー到達時間とレオロジー定数の関係

4.5 材料分離抵抗性が充填性に及ぼす影響

4.5.1 分離抵抗指数と塑性粘度

材料分離抵抗性は、塑性粘度で評価できるとされている。本検討では間隙充填モルタルの材料分離抵抗性を、沈降による骨材の分離が影響する鉛直方向の材料分離抵抗性と、流動時の骨材の分離が影響する水平方向の材料分離抵抗性に分けて考えた。2つの材料分離抵抗性の評価指標である鉛直分離抵抗指数 SR_V および水平分離抵抗指数 SR_H と塑性粘度の関係を図-4.25 に示す。

(1) 鉛直分離抵抗指数 SR_V

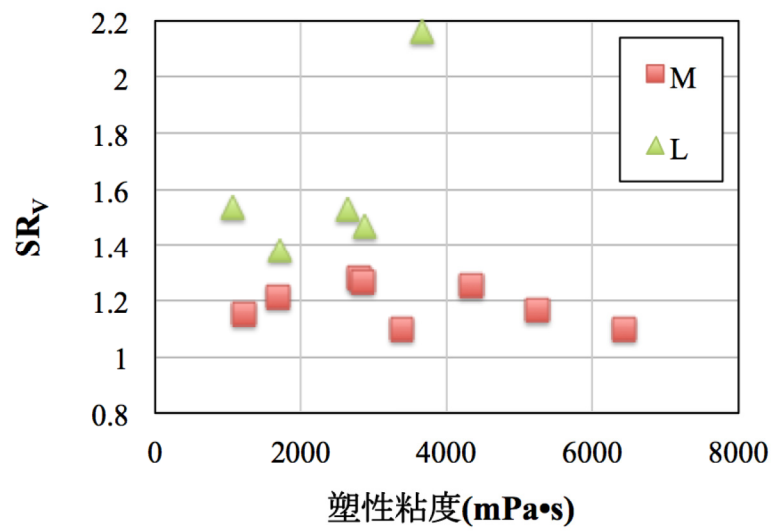
SR_V はその値が 1 に近いほど試料中で大粒径細骨材が均等に分散していることを表し、値が大きくなるほど、骨材の沈降質量が大きくなる。つまり、値が 1 に近いほど試料の材料分離抵抗性は高いと考えられる。粒径に着目すると、L シリーズは M シリーズに比べ、全体的に沈降質量が大きいことがわかる。流体中の粒子の沈降であるから、骨材同士の干渉を考慮しても骨材の粒径が大きくなると質量が増加し、沈降しやすくなると考えられる。

2.3.2 粘性流体中の固体粒子の沈降に示したとおり、粘性を高めることで骨材の沈降速度を 0 に近づけることで材料分離抵抗性が高まると考えられるが、L シリーズおよび M シリーズとも、 SR_V と塑性粘度との間には相関がみられない。

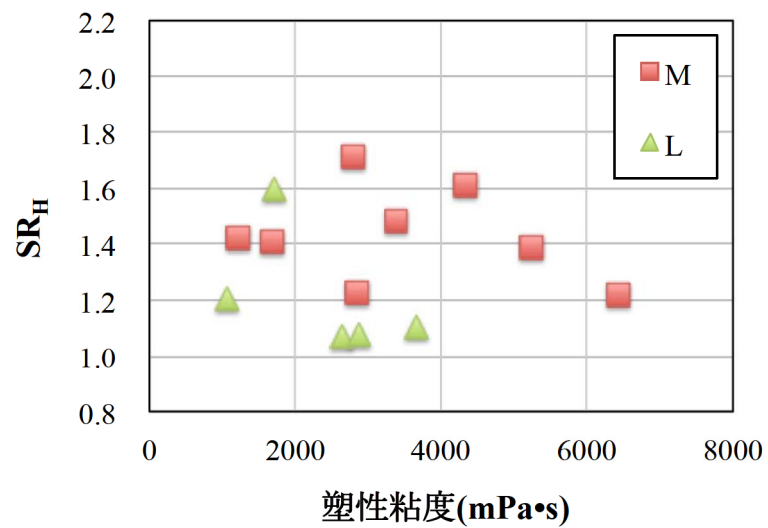
間隙充填モルタルに用いられるような粒径が 5mm 以下の骨材は、その質量が小さいことから、増粘剤が添加されているような粘性の高いモルタルにおいては沈降しづらいことが考えられる。また、モルタルの粘性と骨材との付着性は異なる性状である⁵⁾との見解もあり、沈降分離に対する抵抗性は粘性を高めるだけでは向上しない可能性が示された。

(2) 水平分離抵抗指数 SR_H

SR_H はその値が 1 に近いほど試料中で大粒径細骨材が均等に分散していることを表し、値が大きくなるほど、フロー後の試料において、大粒径骨材が外側に偏在していることになる。つまり、値が 1 に近いほど、試料が水平方向に流動するときの材料分離抵抗性は高いと考えられる。粒径に着目すると、L シリーズは M シリーズに比べ、骨材が均等に分散している。これは、骨材の粒径が大きくなることで質量が大きくなることから、水平方向に骨材を流動させるためのエネルギーが必要となる。そのため、試料の容量が等しい場合、大粒径骨材は流動しづらいことがわかる。しかし、 SR_H は 1 以下にはなっておらず、骨材が内側に多く残留してしまうことはないと考えられる。



(a) 鉛直分離抵抗指数 SR_V



(b) 水平分離抵抗指数 SR_H

図-4.25 分離抵抗指数と塑性粘度

4.5.2 間隙充填率と分離抵抗指数

間隙充填率と分離抵抗指数の関係を図-4.26に示す。

(1) 鉛直分離抵抗指数 SR_V

4.4.1 間隙充填率と塑性粘度の関係で述べたように、間隙幅 5mm に対する L シリーズの No.1、2 (図中、丸で示す2点) に関しては、骨材の架橋現象が起こったことが未充填の原因と考えられる。しかし、間隙充填率と SR_V の間に相関はみられない。すなわち、骨材の架橋現象による未充填は、沈降分離に対する鉛直方向の材料分離抵抗性では評価できない可能性が示唆された。

(2) 水平分離抵抗指数 SR_H

間隙幅 5mm に対する L シリーズに着目すると、骨材の架橋現象が起こったと考えられる No.1、2 (図中、丸で示す2点) は、他の3配合にくらべ、 SR_H の値が大きいことがわかる。つまり、大粒径細骨材が内側より外側により多く存在する時、充填率は低くなる。反対に、 SR_H の値が1に近く、内側と外側に均等に骨材が分布しているとき、充填率は高くなる。これは、水平方向に流動する際、ペースト部と骨材が一体となって流動することを表しており、この性質が骨材の架橋現象を起こす可能性を低くすると考えられる。

また、4.4.1 間隙充填率と塑性粘度の関係で述べたように、間隙幅 2mm に対する M シリーズは、全配合が充填率 90%に満たないため、未充填と判断した。しかし、単純に SR_H と充填率の関係をみると、上記と同様に、 SR_H の値が1に近づくにつれて充填率が高くなる。よって、骨材の架橋現象による未充填は、水平方向への流動時における骨材の分布から得られる水平方向の材料分離抵抗性で評価できる可能性が示された。

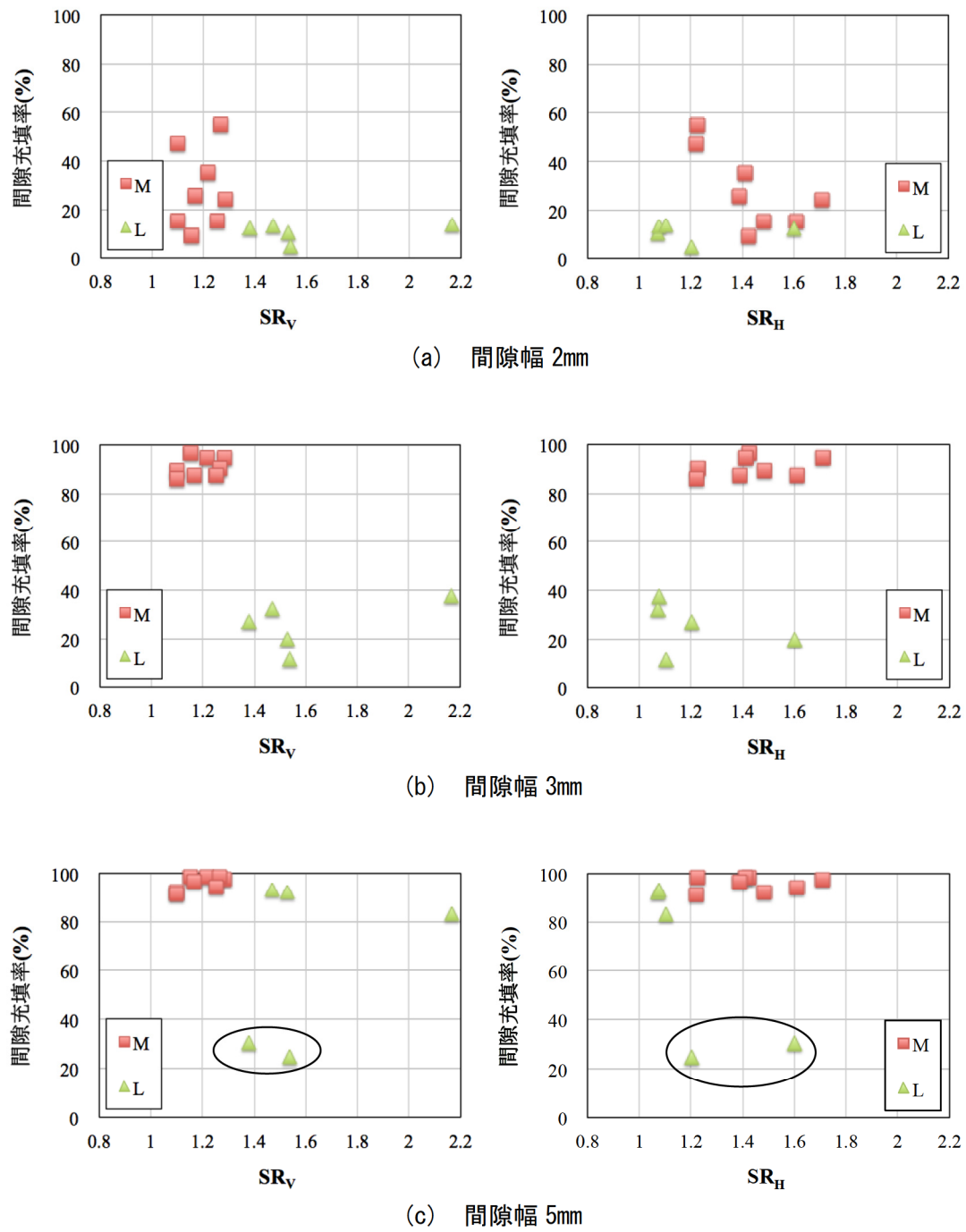


図-4.26 間隙充填率と分離抵抗指数の関係

4.5.3 材料分離抵抗性が充填性に及ぼす影響

間隙幅 5mm における L シリーズの間隙充填率と塑性粘度および SR_H の関係を図 4.27 に示す。4.5.1 分離抵抗指数と塑性粘度および 4.5.2 間隙充填率と分離抵抗指数の結果を合わせて考えると、間隙内での骨材の架橋現象による未充填は、骨材の沈降分離に対する抵抗性だけでは評価できず、水平方向への流動時における骨材の分布から得られる水平方向の材料分離抵抗性で評価できる可能性が示された。

しかし、高流動コンクリートにおけるスランプフローでは、端部に骨材が届かず、内側に骨材が多く存在する場合に、分離していると見なされる。これは、本検討とは正反対の見解であるが、両者を合わせて考えれば、骨材が内側と外側に均等に分布しているほど、材料は分離しておらず、充填率が高くなると考えられる。今後の検討においても、 SR_H を指標として水平方向の材料分離抵抗性を評価し、データを蓄積することが望まれる。

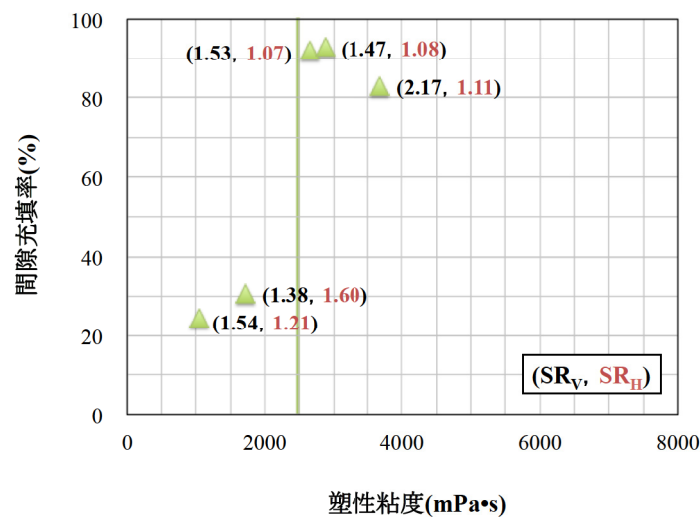


図-4.27 間隙充填率と塑性粘度および SR_H の関係

4.5.4 段差フロー試験における段差の影響

上述した水平方向の材料分離抵抗性に関しては、段差が与える影響を考慮していない。各試料の亚克力板フロー（段差なし）と段差フローを図-4.28に示す。その増分を拡大幅として色を薄く示している。

M シリーズは、塑性粘度によらず段差による拡大幅は概ね 20mm 程度となっていることがわかる。しかし、L シリーズは、拡大する幅は一樣ではなく、元のフローが 240mm 程度の場合でも、40mm 以上伸びるケースがある。

配合において、L シリーズは M シリーズよりも、同一のフローを得るための高性能 AE 減水剤の添加量が多い。つまり、本来のフローは骨材の噛み合わせが流動障害となり、フローが伸びておらず、段差を下ることで、骨材の噛み合わせの影響が低減され、本来ペースト部の流動性を評価していると考えられることができる。

以上より、段差の影響は決して無視できないものであることがわかった。また、材料分離抵抗性とはまた違う性質を評価しているとも考えられるため、“段差フロー”の値が新たな指標となり得る。円盤の直径を適宜変更して、同試験を行うことで、差が顕著となる直径を定め、“段差フロー試験”として今後も検討していくことが望ましい。

また、骨材の分布を把握し、水平分離抵抗指数 SR_H を求める際には、図-4.29に示すように、円形にくり抜いた亚克力板を用意し、段差のない状態で、試験を行うことが望ましい。そこで、今後は水平分離抵抗指数を求める試験を、“段差フロー試験”ではなく、沈降分離試験との比較から“水平分離試験”や、“流動時分離試験”などにする必要がある。

また、本試験は実験的に検討を行ったものである。試験方法には改善の余地があるが、沈降時の分離と、流動時の分離をそれぞれ考慮する必要があることが示されたため、今後も継続して検討することが望まれる。

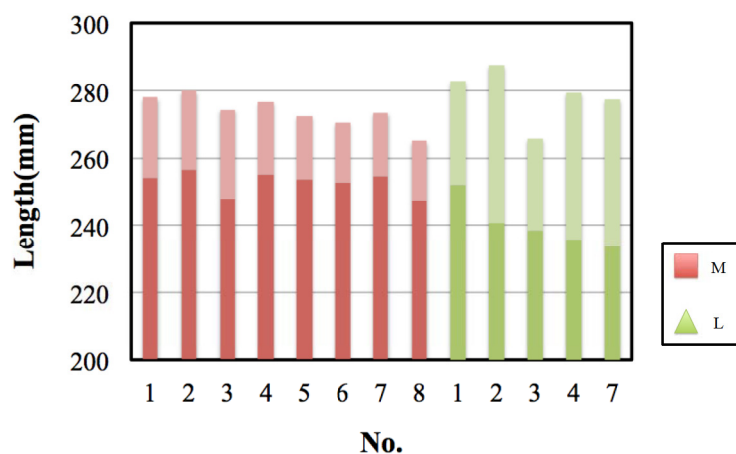


図-4.28 アクリル板フロー（段差なし）とその拡大幅

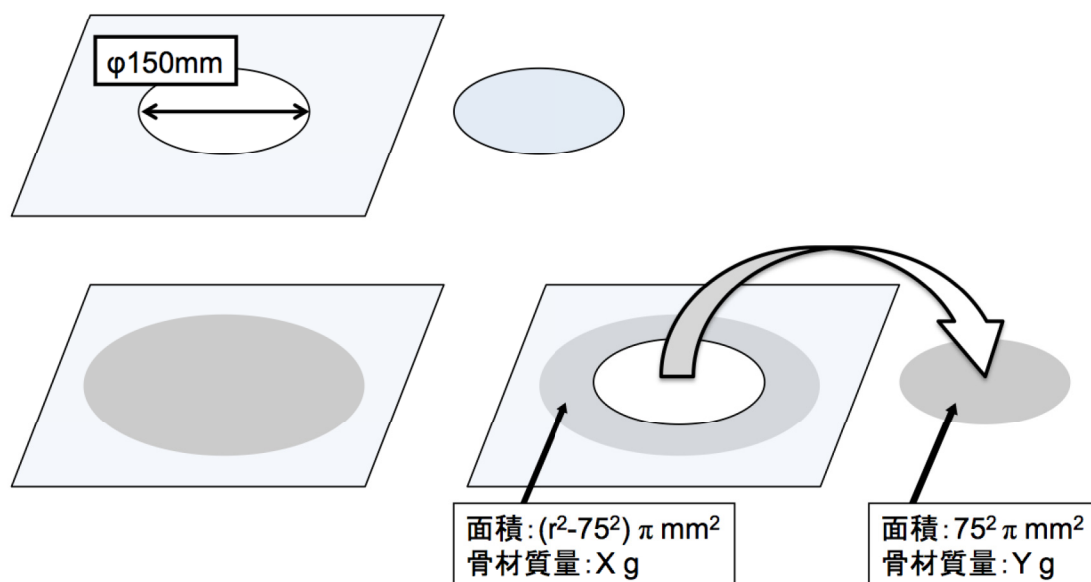


図-4.29 水平方向の材料分離抵抗性を評価する最適な試験方法（案）

4.6 まとめ

本章では、間隙充填モルタルのフローを 250mm に統一し、骨材粒径の異なる試料を作製し、材料分離抵抗性および間隙幅と骨材粒径の関係が充填性に与える影響について検討を行った。以下に本章で得られた知見を示す。

- (1) 骨材粒径を考慮した場合でも、フローが間隙充填性を評価する指標であるとは一概には言えないことが明らかとなった。また、フローが 250mm 程度の場合、間隙充填率が 90%に満たない配合もあることから、フローの条件を満たすだけでは良好な充填性は得られないことが示唆された。
- (2) 間隙幅 2mm では、骨材粒径の影響が大きく、M シリーズ (1.2~2.5mm) および L シリーズ (1.2~5.0mm) は未充填となる。
- (3) 間隙幅 3mm では、M シリーズ (1.2~2.5mm) は骨材粒径の影響がなく、充填可能である。L シリーズ (1.2~5.0mm) は骨材粒径の影響が大きく、未充填となる。
- (4) 間隙幅 5mm では、M シリーズ (1.2~2.5mm) は骨材粒径の影響がなく、充填可能である。L シリーズ (1.2~5.0mm) は、塑性粘度が 2500mPa・s 程度を境に間隙充填率が急激に変化し、90%の条件を満たすことから、本研究の範囲内であれば、骨材の架橋現象を防ぐため、塑性粘度の下限を 2500mPa・s 程度と定めることができる。
- (5) 塑性粘度が低いことで生じる骨材の架橋現象による未充填は、骨材の沈降分離に対する抵抗性だけでは評価できず、水平方向への流動時における骨材の分布から得られる水平方向の材料分離抵抗性で評価できる可能性が示された。

参考文献

- 1) 財団法人建築保全センター：建築改修工事監理指針平成19年度下巻（国土交通省大臣官房官庁営繕部監修）
- 2) 石山陽介、水島遼、宇治公隆、上野敦：間隙充填材の流動性および充填性の評価手法、コンクリート工学年次論文集、Vol.32、No.1、pp.1331-1336、2010
- 3) 出口慎太郎、宇治公隆、上野敦、大野健太郎：間隙充填モルタルの充填性に及ぼす影響要因、コンクリート工学年次論文集、Vol.36、pp.1528-1533、2014
- 4) 白根勇二、佐藤文則、永山功、渡辺和夫：最大寸法80mmの粗骨材を用いたダム用高流動コンクリートの流動性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21、No.2、pp.481-486、1999
- 5) 井上和政、和泉意登志、瀬古繁喜、安部靖弘：高流動コンクリート中のフレッシュモルタルの粘性と粗骨材への付着に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp.95-100、1994

第5章 結論

本研究は、間隙充填モルタルの流動性、材料分離抵抗性、および骨材粒径が間隙充填性に及ぼす影響について検討し、特に、フロー以外の要因が充填性に影響を与える影響について検討したものである。

以下に本研究で得られた知見を取りまとめる。

5.1 塑性粘度の相違が充填性に及ぼす影響

第3章では、間隙充填モルタルのフローを 250mm に統一し、試料の流動性、特に塑性粘度の相違が充填性に及ぼす影響について検討した。フローを 250mm 程度にするだけでは、間隙充填率が 90%に満たない配合もあることから、フローの条件を満たすだけでは良好な充填性は得られないことが明らかとなった。また、間隙幅によらず、粘性が高くなることで、壁面との粘性抵抗が大きくなり、塑性粘度の増加に伴い充填率は低下した。間隙充填率 90%未満を未充填と判断すると、各間隙幅に対する塑性粘度の上限値を定めることができた。また、塑性粘度と同様に、各間隙幅に対する J 漏斗流下時間およびフロー到達時間の上限値を定めることができた。

5.2 骨材粒径の相違が充填性に及ぼす影響

第4章では、間隙充填モルタルのフローを 250mm に統一し、骨材粒径の異なる試料を作製し、材料分離抵抗性および間隙幅と骨材粒径の関係が充填性に与える影響について検討を行った。

骨材粒径を考慮した場合でも、フローが間隙充填性を評価する指標であるとは一概に言えないことが明らかとなった。間隙幅 2mm では、骨材粒径の影響が大きく、M シリーズ (1.2～2.5mm) および L シリーズ (1.2～5.0mm) は未充填となる。間隙幅 3mm では、M シリーズ (1.2～2.5mm) は骨材粒径の影響がなく、充填可能である。L シリーズ (1.2～5.0mm) は骨材粒径の影響が大きく、未充填となる。間隙幅 5mm では、M シリーズ (1.2～2.5mm) は骨材粒径の影響がなく、充填可能である。L シリーズ (1.2～5.0mm) は、塑性粘度が 2500mPa・s 程度を境に間隙充填率が急激に変化し、90%の条件を満たすことから、本研究の範囲内であれば、骨材の架橋現象を防ぐため、塑性粘度の下限を 2500mPa・s 程度と定めることができた。

塑性粘度が低いことで生じる骨材の架橋現象による未充填は、骨材の沈降分離に対する抵抗性だけでは評価できず、水平方向への流動時における骨材の分布から得られる水平方向の材料分離抵抗性で評価できる可能性が示された。

5.3 まとめ

これまでの検討をまとめ、本研究の範囲内で得られた、間隙幅と骨材粒径に応じた各試験値の上限値および下限値を表-5.1 に示す。基本的に、用いる骨材の最大粒径を間隙幅以下にすることが重要であるが、粒径と同等以上の間隙幅においても、骨材の架橋による未充填も生じるため、注意が必要である。

今後、フローを 300mm 統一する、配合条件を変更する、骨材の粒度や形状に着目する、といったように、検討項目を変えてデータを蓄積することで、それぞれに対応したフロー、塑性粘度の上限値や下限値が求められると考えられる。最終的に表-5.1 に示すような一覧表を、W/C や S/C などの配合条件、気温などの環境条件ごとに作成すれば、配合選定や、実際に現場で管理する上で非常に便利なものとなると考えられる。

表-5.1 間隙幅と骨材粒径に応じた各試験値の上限値および下限値

W/C 0.4 S/C 0.8											
間隙幅	最大粒径 (mm)	フロー(mm) 許容誤差 (±5%)	充填	塑性粘度 (mPa・s)		J漏斗流下時間(s)				200mmフロー 到達時間(s)	
				下限	上限	J14		JP		下限	上限
						下限	上限	下限	上限		
2mm	1.2	250	○	—	2588	—	9.09	—	13.82	—	3.28
		300		—		—		—		—	
	2.5	250	×	—	—	—	—	—	—	—	—
		300									
	5.0	250	×	—	—	—	—	—	—	—	—
		300									
3mm	1.2	250	○	—	4514	—	16.24	—	26.34	—	8.19
		300		—		—		—		—	
	2.5	250	○	—	4514	—	16.24	—	26.34	—	8.19
		300									
	5.0	250	×	—	—	—	—	—	—	—	—
		300									
5mm	1.2	250	○	—	8489	—	30.98	—	52.18	—	18.33
		300		—		—		—		—	
	2.5	250	○	—	8489	—	30.98	—	52.18	—	18.33
		300									
	5.0	250	○	2500	8489	8.77	30.98	13.25	52.18	3.06	18.33
		300									

謝辞

本論文は、平成 24 年から平成 26 年度までの 3 年間、首都大学東京および首都大学東京大学院に在学中に行った研究を取りまとめたものです。

本論文を作成するにあたり、非常にご多忙の中、研究に対して懇切丁寧な御指導を下さり、多大な助言と御協力をいただきました、首都大学東京大学院都市環境科学研究科教授、宇治公隆先生に厚く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、様々な知識をもとにした的確な御助言をしていただき、私生活においても面倒を見ていただいた、首都大学東京大学院都市環境科学研究科准教授、上野敦先生に厚く御礼申し上げます。

本論文の審査にあたり、厳しくも優しい姿勢でご指摘いただきました、首都大学東京大学院都市環境科学研究科都市基盤環境学域准教授、中村一史先生に厚く御礼申し上げます。

3 年間の研究室生活において、研究の内容のみならず様々な御指導をして下さり、私生活においても面倒を見ていただいた、首都大学東京大学院都市環境科学研究科助教、大野健太郎先生に厚く御礼申し上げます。

在学中、毎回実験を手伝っていただき、研究室においても、明るく元気な姿勢で常に励ましていただいた、青木薫主事に深く感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、研究の方向性を考える際にヒントとなるような助言を下さり、また、業務で忙しい中、突然の質問にも快く応えていただいた、日鉄住金高炉セメント株式会社 兼安真司様に深く感謝いたします。

学部時代の研究にあたり、御自身の研究で忙しい中、多大な御協力と御助言をいただき、常に筆者の目標であった、石田樹先輩、川瀬麻人先輩、黒原創先輩、代田哲郎先輩、藤野祐樹先輩に心から御礼申し上げます。

研究から就職活動まで、幅広くお世話になりました、榊原誠樹先輩、朱小燕先輩に深く感謝いたします。また、筆者と共通のテーマで研究を進め、本研究の道筋を示していただいた、出口慎太郎先輩に深く感謝いたします。

研究室で疲れている時、いつも優しい笑顔で支えてくれた、博士課程 3 年の張軍雷先輩、博士課程 2 年の Tran vu dung 先輩、博士課程 1 年の王博先輩、王亮先輩に感謝いたします。

筆者の実験にあたり、多大な御協力をして下さった、同期の石川鞠子さん、笠原雄司君、中村光介君、学部 4 年生（平成 25 年度卒）の古川歩さんに深く感謝いたします。

授業や研究で忙しい中、何度も実験を手伝って下さり、頼れる後輩として研究室生活を支えてくれた、修士 1 年の飯塚亮太君、佐藤凜奈さん、長岡貴紀君、古川凌輔君、間々田

憲哉君に感謝いたします。

各自研究で忙しい中、実験に参加していただき、常に研究室の雰囲気を明るくし、本研究室に新たな風を吹き込んでくれた学部 4 年の内田早紀さん、小倉達也君、児玉文彦君、永山剛君、板東真輝君に感謝いたします。

そして、各々の研究や就職活動で忙しい中、筆者に多大な御協力をして下さり、また、何事にも常に全力で妥協することなく、お互いに切磋琢磨しあい、非常に充実し、楽しい研究室生活を過ごさせて下さいました、同期の修士 2 年の市川直樹君、菊池亮君、佐々木優衣さん、新津祐樹君、村田哲君、李韋利君に、心から感謝いたします。

他にも、ここでは言い表せなかった他の関係者の方々に感謝いたします。

最後に、本研究を進める上で、また大学生活全般において、筆者の体調を常に気かけ、どんなに遅く帰宅しても温かいご飯を用意してくれ、精神的にも肉体的にも支え続けて下さいました家族に深く感謝し、本論文の謝辞とさせていただきます。

平成 27 年 3 月